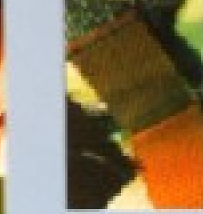
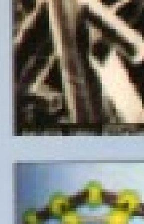
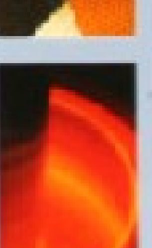
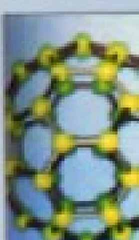
中国材料工程大典

中国机械工程学会　中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

第25卷　材料特种加工成形工程（下）

王至尧　主编



CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

中国材料工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

CMDC 中国材料工程大典编委会

第25卷 材料特种加工成形工程（下）

王至尧 主编

（京）新登字 039 号

内 容 简 介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国 39 位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写，全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果，集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容，涵盖了材料工程的各个领域，将最新的实用数据（特别是与国际接轨的标准数据）、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来，并附应用实例，充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材，合理用材，应用先进的材料成形加工技术，提高产品质量和性能，降低产品成本，增强产品市场竞争力的需要，而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新，促进制造业的发展，提高我国制造业的竞争能力，具有重要的现实意义。

本书为第 25 卷，材料特种加工成形工程（下）。主要内容包括材料高能束流加工技术、快速原型与快速制造、电加工机床质量控制与检测等。

本书主要供具有大专以上文化水平，从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理材料特种加工成形工程的各类技术问题时使用，起备查、提示和启发的作用，也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

中国材料工程大典．第 25 卷，材料特种加工成形工程．下/王至尧主编．—北京：化学工业出版社，2005.8
ISBN 7-5025-7327-5

Ⅰ．中…　Ⅱ．王…　Ⅲ．①材料科学②工程材料—特种加工—成形　Ⅳ．TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 094391 号

中国材料工程大典
第 25 卷
材料特种加工成形工程（下）
中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会
王至尧　主编
责任编辑：周国庆　陈志良　李骏带
责任校对：凌亚男
封面设计：雷嘉琦

*

化学工业出版社出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码：100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销
北京蓝海印刷有限公司印装
开本 880mm×1230mm 1/16　印张 36 1/4　字数 1638 千字
2006 年 1 月第 1 版　2006 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7－5025－7327－5
定价：120.00 元

序

材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入21世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的1/3以上，约占全国工业生产的4/5，为国家财政提供1/3以上的收入，占出口总额的90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学会和中国材料研究学会牵头，会同中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》（简称《材料大典》），其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为科技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过5年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共26卷约7000万字的巨著，是39位两院院士和1200余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了健康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导致眼睛视网膜脱落……。这种敬业精神与坚强毅力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会的支持。这些学会的众多专家教授积极参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学会和中国材料研究学会的专家教授一起完成这项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员会、国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积极帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的殷切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的科研院所、院校、企业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顺利出版。

《材料大典》既总结了10多年来在材料工程方面的最新数据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长
中国材料工程大典编委会主任

2005年9月23日

前　言

《材料特种加工成形工程》为《中国材料工程大典》中的卷目之一。

材料特种加工成形是制造业材料成形的主要组成部分，是航天、航空、电子、兵器、船舶、汽车、电力、钢铁、石化、装备等支柱产业零部件加工的主要手段之一，涵盖了现代制造业中去除成形加工、受迫成形加工、离散-堆积成形加工、生长成形、极端制造等加工方法。

中国目前已成为材料特种加工成形大国。进入 21 世纪，中国的材料特种加工成形迎来了持续发展的大好局面，同时也面临着国外制造强国高品位、高精度、高自动化、高智能化等严峻挑战。只有向世界先进水平看齐，提高整体集成技术和创新水平，中国的材料特种加工才能在世界市场激烈的竞争中发扬优势，这也是技术人员面临的紧迫和艰巨的任务。《中国材料工程大典》中《材料特种加工成形工程》是在此形势和任务需求条件下编写出版的。

《材料特种加工成形工程》中是国机械工程学会特种加工分会首次组织编写的，是迄今为止篇幅最大、涵盖内容最新、最全的材料特种加工专业工具书。本书内容包括概论、材料电火花成形加工技术、材料数控电火花线切割技术、材料电化学加工技术、材料高能束流加工技术、快速原型与快速制造、电加工机床质量控制与检测等 7 篇约 400 万字。参加本书编写的有全国著名制造企业、研究所和大学等各方面专家教授共 50 余名。参加编写的主要单位有北京控制工程研究所、清华大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、北京航空制造工程研究所、苏州电加工机床研究所、苏州三光科技集团、上海同济大学、大连理工大学、西北工业大学、江苏镇江大学、首都航天机械公司等。由王至尧负责统稿。编写工作历时 4 年完成。

各篇的主编分别如下:

第 1 篇　概论　　齐从谦

第 2 篇　材料电火花成形加工技术　　刘晋春　白基成　郭永丰

第 3 篇　材料数控电火花线切割技术　　李明辉

第 4 篇　材料电化学加工技术　　徐家文

第 5 篇　材料高能束流加工技术　　王亚军

第 6 篇　快速原型与快速制造　　颜永年

第 7 篇　电加工机床质量控制与检测　　连克仁

本书全面、系统地反映了我国材料特种加工成形的成就与经验，介绍了国内外材料特种加工的先进技术和研究动向，具有较强的“科学性、先进性和实用性”。在编写过程中强调以“全而精、新而准、实用便查”为特点，在整体设计上既立足全局，又突出重点。从材料特种加工成形的科学基础、加工工艺与设备、生产质量管理与检测，以及国内外最新技术应用等方面作了全方位论述；在取材上以“基础、通用、先进、实用”应用工程化为原则。其中第 6 篇快速原型与快速制造篇部分章节由美国卡布雷教授（Dr. J. Keverian）参与了编写，并提供相关资料，在此表示感谢。

本书主要供从事材料特种加工成形科技人员查阅使用，也可供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

感谢中国机械工程学会、中国材料研究学会和中国材料工程大典编委会对本卷编写工作的指导与大力支持。由于编写时间紧迫和编者水平有限，不当之处在所难免，恳请读者指正。

2005 年 10 月 6 日

目　录


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET

第 5 篇

材料高能束流加工技术

主 编 王亚军
主 审 王先逵
副主编 段爱琴 张永康 赵福令
编 写 张永康 周建忠 左敦稳 段爱琴
邹世坤 刘方军 左从进 李晋炜
胡 刚 姚振中 武洪臣 张东辉
马国佳 叶云霞 徐路宁 周建明
王续跃 王 军
审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会





第1章 激光加工技术

1 导论

1.1 激光的特性

激光是强相干光源，它所辐射的激光是一种受激辐射相干光，是在一定条件下光电磁场和激光工作物质相互作用，以及光学谐振腔的选模作用的结果。激光束与普通光相比最突出的特性是它具有高度的方向性、单色性、相干性和亮度。实际上，这四个特性本质上可归结为一个特性，即激光具有很高的光子简并度，也就是说，激光可以在很大的相干体积内有很高的相干光强。以下我们将分别讨论激光束的这四个特性，说明这些特性的物理意义并分析激光束具有这些特性的原因。

1）方向性　激光器输出的激光束具有很高的方向性，一般激光器只向着数量级约为 10^{-6}sr（球面度）的立体角范围内发射激光束，它比普通光源 4π 弧度的立体角范围里发光要小几百万倍。由此可见，激光束的方向性比普通光源发出的光好得多。

激光束之所以具有方向性强的特点是由于激光器受激辐射的机理和光学谐振腔对光束的方向限制所决定。然而，激光所能达到的最小光束发散角还要受到衍射效应的限制，它不能小于激光通过输出孔径的衍射角 θ_m，θ_m 称为衍射极限。

$$\theta_m \approx \frac{\lambda}{D} \tag{5.1-1}$$

式中，θ_m 为衍射角，rad；λ 为激光波长，μm；D 为光斑直径，mm。由此可得激光束的立体发散角

$$\Omega_m = \theta_m^2 = \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 \tag{5.1-2}$$

式中，Ω_m 为立体衍射角，sr。

不同类型激光器的方向性差别很大，这与工作物质类型和均匀性、光腔类型、腔长、激励方式以及激光器的工作状态等都有关。例如，He－Ne 气体激光器，$\lambda = 0.6328$ μm，取 $D = 3$ mm，则衍射极限 $\theta_m \approx 2\times10^{-4}$ rad。固体激光器方向性较差，一般在 10^{-2} rad；半导体激光器发散角更大，约在 $(5\sim10)\times10^{-2}$ rad。

2）单色性　光源的单色性是指光源谱线的宽窄程度。如果谱线较窄，则说明光源单色性好，反之则单色性差。单色性常用比值 $\Delta\nu/\nu$ 来表征，ν 为谱线的中心频率，$\Delta\nu$ 为谱线宽度，当然单色性也可用 $\Delta\nu$ 直接表示。

普通光源的单色性是很差的，即使是单色性最好的氪灯，线宽也有 10^4 Hz～10^6 Hz。激光产生的原理决定了其线宽相当窄，理想状况下其线宽接近于零。但实际情况由于种种谱线加宽机制的作用，使得激光谱线有一定的宽度，即使这样，激光的谱线线宽与普通光源的线宽也是不可比的，He－Ne 激光器的线宽极限可达 10^{-4} Hz，显然这是极高的单色性。

3）相干性　光的相干性是指在不同时刻、不同空间点上两个光波场的相关程度。这种相关程度在两个光波传播到空间同一点叠加时，则表现为形成干涉条纹的能力。

光频电磁场的相干特性，完全由辐射场本身的空间方向分布特性和频率分布特性所决定。相干性又可分为空间（横向）相干性和时间（纵向）相干性。空间相干性用来描述垂直于光束传播方向上各点之间的相位关系，而时间相干性则用来描述光束传播方向上各点的相位关系。

空间相干性是指光源在同一时刻、不同空间，各点发出的光波相位关联程度。光束的空间相干性和它的方向性是紧密联系的。对于普通光源，其空间相干性可以用杨氏双缝干涉试验来说明光辐射场的空间相干性。光束发散角满足条件 $\Delta\theta \leqslant \frac{\lambda}{\Delta x}$，由此可看出光束发散角与空间相干性紧密联系。发散角小，则空间相干性好，反之，空间相干性差。由于激光本身就具有方向性好，即发散角小的特点，所以激光光束具有明显的空间相干性。

时间相干性是指光源上同一点在不同时刻 t_1 和 t_2 发出的光波的相位关联程度。同样，光束的时间相干性和它的单色性亦是紧密联系的。对于普通光源可用迈克尔逊干涉仪试验来说明光波辐射场的时间相干性。

$$\tau_c = 1/(\Delta\nu) \tag{5.1-3}$$

该式体现了光波的相干时间 τ_c 和单色性 $\Delta\nu$ 之间的关系。由于激光辐射的单色性很高，频宽 $\Delta\nu$ 很小，其相干时间 τ_c 很长，亦即时间相干性很好。

4）亮度　光源的亮度（$\mathrm{W\cdot cm^{-2}\cdot sr^{-1}}$）是表征光源定向发光能力强弱的一个重要参量，其定义为

$$B = \frac{\Delta P}{\Delta S\Delta\Omega} \tag{5.1-4}$$

式中，ΔP 为光源在面积为 ΔS 的发光表面上和 $\Delta\Omega$ 立体角范围内发出的光功率，对于激光器来说，ΔP 相当于输出激光功率；ΔS 为激光束截面积；$\Delta\Omega$ 为光束立体发散角。

普通光源，由于方向性很差，能量非常分散，即使使用透镜进行聚焦，能量也很难聚到很小的范围内，故亮度极低。例如太阳的亮度值为 $B \approx 2\times10^3$ W/（$\mathrm{cm^2\cdot sr}$）。对于激光器来说，输出光束的发散角很小，其亮度是普通光无法比拟的。按目前发展水平，一般常见的各类激光器输出激光的亮度值范围为

气体激光器：$B = 10^4 \sim 10^8$ W/（$\mathrm{cm^2\cdot sr}$）

固体激光器：$B = 10^7 \sim 10^{11}$ W/（$\mathrm{cm^2\cdot sr}$）

调 Q 固体激光器：$B = 10^{12} \sim 10^{17}$ W/（$\mathrm{cm^2\cdot sr}$）

由上述数值可看出，激光输出定向亮度值远远大于普通光源的亮度值。目前利用锁模技术，已能使钕玻璃激光器发出 $\Delta t < 3\times10^{-12}$ s 的超短脉冲，峰值功率已超过 17×10^{12} W，其亮度就更高了。

1.2 光学谐振腔

激光之所以具有方向性、单色性、相干性和高亮度的特点，是与激光器中光学谐振腔密不可分的。光学谐振腔是常用激光器的主要组成部分之一，其作用包括两点。第一，提供正反馈，在简单情况下，激光谐振腔是在激活物质两端适当地放置两个反射镜组成，受激辐射经过两反射镜多次反射，从而使受激辐射多次通过激活介质而进一步被放大，当受激辐射所提供的增益超过损耗时，建立并维持自激振荡。第二，控制腔内振荡光束的持性，使腔内建立的振荡被限制在腔所决定的少数本征模式中，从而提高单个模式内的光子数，获得单色性好、方向性好的强相干光。研究光学谐振腔的目的，就是通过了解谐振腔的特性，来正确设计激光器的谐振腔，使激光器的输出光束特性达到应用的要求。

1.2.1 有关光学谐振腔的基本概念

（1）光学谐振腔的构成和分类

最简单的光学谐振腔是在激活介质两端恰当放置两个镀有高反射率的反射镜构成。随着激光技术的发展，以后又广泛采用由两块具有公共轴线的球面镜构成的谐振腔，称为共轴球面腔，这种腔的主要特点是：侧面敞开，没有光学边界以抑制振荡模式，并且它的轴向尺寸（腔长）远大于振荡波长，一般也远大于横向尺寸即反射镜的宽度。因此，这类腔为开放式光学谐振腔，简称开腔。根据光束几何逸出损耗的高低，开腔通常可分为稳定腔、非稳腔和临界腔三类。通常，气体激光器具有开腔的特性。

在固体激光器中，由于固体激光材料通常都具有比较高的折射率，在侧壁磨光的情况下，那些与轴线交角不太大的光线在侧壁上发生全内反射，因此如果使得腔反射镜紧贴着激光棒的两端，这样构成的激光谐振腔为封闭腔，从理论上分析这类腔时作介质腔处理。

另一种光腔是气体波导谐振腔，其结构为一段空心介质波导管两端适当位置处放置两款适当曲率的反射镜片。这样，在空心介质波导管内，场服从波导管中的传输规律；而在波导管与腔镜之间的空间中，场按与开腔类似的规律传输。在这种腔中，由于波导管的孔径往往较小，所以不能忽略侧面边界的影响。

以上是从光在两反射镜之间传输时，侧面边界对光传输的影响角度进行的分类。实际上谐振腔还可以按不同的方法分类，如端面反馈腔与分布反馈腔、球面腔与非球面腔、高损耗腔与低损耗腔、驻波腔与行波腔、两镜腔与多镜腔、简单腔与复合腔等。

（2）光学谐振腔的作用

谐振腔是激光器的重要组成部分之一，对大多数激光工作物质，适当结构的谐振腔对产生激光是必不可少的。其主要作用表现在以下两个方面。

1）提供光学正反馈作用　激光器内受激辐射过程具有“自激”振荡的特点，即由激活介质自发辐射诱导的受激辐射，在腔内多次往返而形成持续的相干振荡。腔的正反馈作用是通过使光束在腔内往返而增加光束通过的路程，进而不断放大光强，直到能够保证有足够能量克服腔内损耗而维持自激振荡。

谐振腔的光学反馈作用取决于两个因素：一是组成腔的两个反射镜面的反射率，反射率越高，反馈能力越强；二是反射镜的几何形状以及它们之间的组合方式。上述两个因素的变化都会引起光学反馈作用大小的变化，即引起腔内光束损耗的变化。

2）产生对振荡光束的控制作用　主要表现为对腔内振荡光束的方向和频率的限制。由于激光束的特性与光腔结构有密切联系，因而可用改变腔的参数（反射镜、几何形状、曲率半径、镜面反射率及配置）的方法来达到控制激光束。具体地说，可达到以下几方面的控制作用：①有效地控制腔内实际振荡的模式数目，使大量的光子集结在少数几个状态之中，提高光子简并度，获得单色性好、方向性强的相干光；②可以直接控制激光束的横向分布特性、光斑大小、谐振频率及光束发散角等；③可以改变腔内光束的损耗，在增益一定的情况下能控制激光束的输出功率。

3）光学谐振腔的稳定条件　在光学谐振腔中，光在两反射镜之间来回不断反射，如果在腔内经过几次反射后就离开腔体，则腔的损耗较高，因而不易形成激光。一般激光器要求谐振腔能够保证光在腔内来回反射始终不离开谐振腔，满足这一要求的腔称为稳定腔。

腔内近轴光束经往返无限多次而不会横向逸出腔外即没有几何偏折损耗，即认为谐振腔处于稳定工作状态，称为稳定腔，其特点是横向逸出损耗可以忽略。反之则腔内任何近轴光束在往返有限次后，会横向偏折腔外，从几何上看必定是高损耗的，这种谐振腔处于非稳定工作状态，称为非稳定腔。当然，不是说这类腔不能稳定工作，而是仅指这类腔损耗大而已，在有些高增益激光器中仍需应用。

1.2.2　光学谐振腔的模式

电磁场理论表明，在具有一定边界条件的腔内，电磁场只能存在一系列分立的本征状态之中，场的每种本征状态将具有一定的振荡频率和空间分布。通常将谐振腔内可能存在的电磁场本征态称为腔的模式（或称波型）。从光子的观点来看，腔的模式也就是腔内可区分的光子状态，同一模式内的光子具有完全相同的状态（如频率、偏振和运动方向），不同的模对应于不同的场分布和振荡频率。光学谐振腔的模式可以分为纵模和横模。

1）纵模　均匀平面波传播在平行平面腔内沿腔轴线方向的往返腔镜上反射时，入射波和反射波会发生干涉。为在腔内形成稳定的振荡，要求光波因干涉而得到加强。由多光束干涉理论知道，干涉的条件是：光波在腔内沿轴线方向传播，在腔内往返一周再回到原来位置时，应该与初始出发波同相，即相差 $\Delta\phi$ 为 2π 的整数倍，也就是说，只有某些特定频率的光才能满足谐振条件：

$$\Delta\phi = q \times 2\pi \tag{5.1-5}$$

式中，q 为正整数。

设图 5.1-1 中所示的平行平面谐振腔内充满折射率为 η 的均匀介质，腔长为 L（几何长度），光在腔内沿轴线方向来回一周所经历的光学长度为 $2L' = 2\eta L$。由光程差和相差之间的关系得到相位改变量为

$$\Delta\phi = \frac{2L'}{\lambda_0} \times 2\pi = \frac{2\eta L}{\lambda_0} \times 2\pi = q \times 2\pi \tag{5.1-6}$$

式中，λ_0 为光波在真空中的波长；L' 为腔的光学长度；q 为整数。

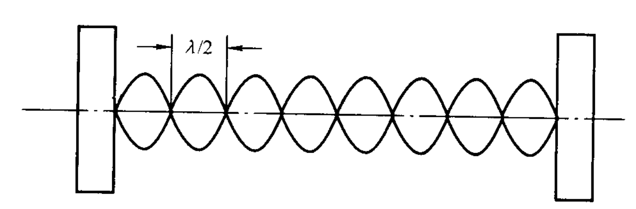


图 5.1-1　光腔内形成驻波示意图

将满足上式的波长用 λ_{0q} 来标识，则由式（5.1-6）可得

$$L' = q \times \frac{\lambda_{0q}}{2} \tag{5.1-7}$$

上式也可以用频率来表示，则有：

$$\nu_q = q \times \frac{c}{2L'} \tag{5.1-8}$$

由上述讨论可知，长度为 L 的平行平面腔只对频率满足式（5.1-7）和式（5.1-8）提供正反馈，因此，这两式就是平面波在该腔中传播的谐振条件，λ_{0q} 为腔的谐振波长，ν_q 称为腔的谐振频率。

在平行平面腔内存在两列沿轴线相反方向传播的同频率光波，这两列光波叠加的结果，将在腔内形成驻波。根据波动光学，当光波波长与平行平面腔腔长 L 满足式（5.1-7）时，将在腔内形成稳定的驻波场，这时腔长应为半波长的整数倍，参看图 5.1-1。所以式（5.1-7）又称为驻波条件，激光器中满足谐振条件的不同纵模对应着谐振腔内各种不同的稳定驻波场。

平行平面腔中，满足式（5.1-7）沿轴线方向（即纵向）形成的驻波场称为它的本征模式。其特点是：在腔的横截面内场是均匀分布的，沿腔的轴线方向形成驻波，驻波的波节数由 q 决定。通常把由整数 q 所表征的腔内纵向的稳定场



分布称为激光的纵模，q 称为纵模的序数（即驻波系统在腔的轴线上零场强度的数目）。不同的纵模相应于不同的 q 值，对应不同的频率。

腔内两个相邻纵模频率之差 $\Delta\nu_q$ 称为纵模间隔。由式（5.1-8）可得

$$\Delta\nu_q = \nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2L'} = \frac{c}{2\eta L} \tag{5.1-9}$$

由此可知，$\Delta\nu_q$ 与 q 无关，对于一定的光腔为一常数，腔的纵模在频率分布上是等距离排列的，如图 5.1-2 所示。其形状像一把梳子，常称为“频率梳”，图中每一个纵模均有一定的谱线宽度 $\Delta\nu_c$。但实际上在激光器光学谐振腔中能够存在的纵模在满足驻波条件的同时，符合一定的阈值条件，而且还要能够在“模竞争”中获胜。

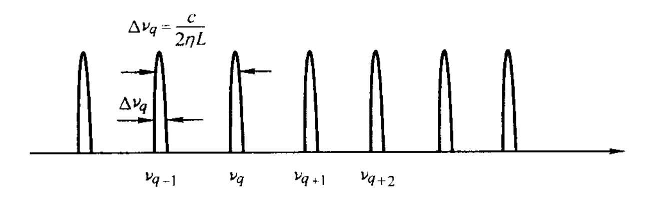


图 5.1-2 光学谐振腔内满足驻波条件的纵模形成的“频率梳”

2）横模　除了纵向（沿光腔轴线方向 z 向）外，腔内电磁场在垂直于其传播方向的横向 $x-y$ 面内也存在稳定的场分布，通常称为横模。纵模是由于在腔内的多次往返传播形成纵向稳定驻波场分布，那么往返传播对横向光场分布是什么影响呢？

设平行平面谐振腔如图 5.1-3a 所示，两块反射镜的直径为 $2a$，间距为 L（即腔长）。由于反射镜几何尺寸是有限的，因此只有落在镜面上的那部分光束才能被反射回来，亦即当光束在两镜间往返传播时，必然会因镜边缘的衍射效应而产生损耗。设初始时刻在镜 1 上有某个场分布 u_1，则光波在腔镜中由镜 1 传到镜 2 时，将在镜 2 上产生一个新的场分布 u_2，场 u_2 经过第二次反射传播后又将在镜 1 上产生一个新的场分布 u_3，每经过一次传播，光波因衍射而损失一部分能量，并且衍射还将引起能量分布的变化。因此，经过一次往返传播之后所生成的场 u_3 不仅振幅小于 u_1，而且其分布可能与 u_1 不同。以后 u_3 又产生 u_4…，这一过程将一直往返下去。理论分析表明，经过足够多次的往返传播之后，腔内形成这样一种稳态场，它的相对分布不再受衍射影响，它在腔内往返一次后能够“自再现”出发时的场分布，这种稳态场经一次往返后惟一可能的变化，仅是镜面上各点的场振幅按同样的比例衰减，各点的相位发生同样大小的滞后。这种在腔反射镜面上经过一次往返传播后能“自再现”的稳定场分布称为自再现模或横模。若两个镜面是完全相同的对称腔，这种稳定场分布经单程传播后即实现自再现。

在实际情况中，谐振腔的截面是受腔内的其他光阑所限制。如气体激光器，放电管孔径就是谐振腔的限制孔。为了形象地理解开腔中自再现模的形成过程，把平行平面谐振腔中光波来回反射的传播过程，等效于光波在光阑传输线中的传播。这种光阑传输线如图 5.1-3b 所示，它由一系列间距为 L、直径为 $2a$ 的同轴孔径构成，这些孔径开在平行放置无限大、完全吸收的屏上。设有一个无限扩展的具有等相位面的平面光波，沿轴向射到第一个光阑上，如图 5.1-3c 所示，假如入射光在进入第一个光阑之前，场的振幅分布沿光阑是均匀的。经第一个光阑后由于衍射作用将使波阵面发生畸变，部分光将偏离原来的传播方向，产生一些衍射瓣，使光波的振幅和相位分布均发生一些变化，射到光阑孔以外的光将被黑体屏完全吸收。当通过第二孔时，边缘部分的衍射波又被光阑所挡，其边缘强度将比中心部分小，且振幅和相位分布又产生了一些新的变化。这样顺次通过第三、四光阑时将继续发生上述过程，每通过一次光阑，光波的振幅和相位都要发生一次改变。可以设想，通过一系列的光阑后光波逐渐趋近于一种稳定的状态，即相当于镜面上来回反射光波的相对振幅和相位分布不再发生变化，这种稳态“自再现”场分布称为谐振腔的横模。这种分布的特点是光能集中在光斑中心部分，而边缘部分光强甚小。

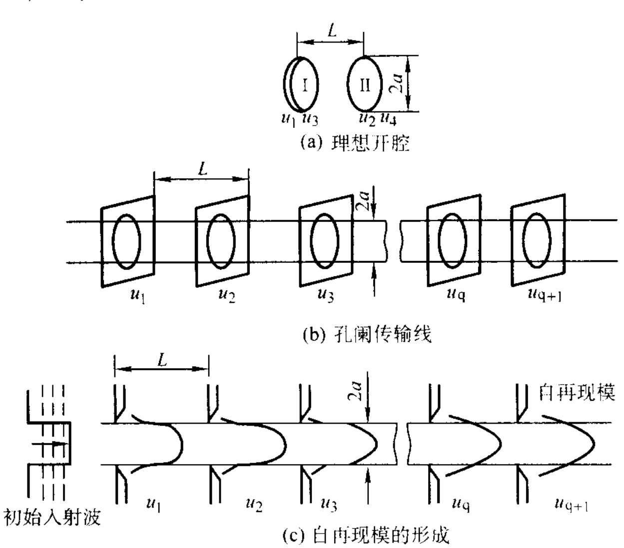


图 5.1-3 开腔中自再现模的形成

应当指出，振荡模主要是因为光波通过光阑系统，一再受到周期性的损失，其振幅和相位不断地进行再分布所造成的结果，它与初始的波形特性无关，即使原始波不是空间相干的，它在经过一系列光阑之后，也将变成相干光。因为光孔截面上的一列子波的传播，在衍射时不仅使部分光波衍射朝外，也使一部分光波衍射朝内，光阑截面上的各列子波的这种相互混杂，在经过大量的穿透之后，光阑截面上一点的光波就不总是与第一光阑上某一点的光波相联系，而是与它整个截面上的子波列有关。在这种情况下，一种原来是部分空间相干的或完全不相干的准单色光，将可能变成完全的空间相干光。当然，在空腔中，这种过程将伴有巨大的能量损失。在激光器中，这种损失将由激活介质的增益获得补偿。

综上所述，激光的横模，实际上就是谐振腔所允许的（也就是在腔内来回反射，能保持稳定不变的）光场的各种横向稳定分布。

不同的横模对应于不同横向稳定的光场分布和频率，图 5.1-4 示出矩形反射镜（轴对称）和圆形反射镜（旋转对称）系统中最初若干个横模的图形。

激光的模式一般用符号 TEM_{mnq} 来标记，其中 TEM 表示横向电磁场，q 为纵模的序数，即纵向驻波波节数，m，n 为横摸的序数，用正整数表示，它们描述镜面上场的节线数。我们把 $m=0$，$n=0$，TEM_{00q} 称为基模（或横向单模），是光斑的最简单结构，模的场集中在反射镜中心。而其他的横模称为高阶横模，即在镜面上将出现场的节线（即振幅为零的节线），且场分布的“重心”也将靠近镜的边缘。不同横模不仅振荡频率不同，在垂直于其传播方向的横向 $x-y$ 面内的场分布也不同。对于方形镜（轴对称情况）TEM_{mn}，m 表示 x 方向的节线数；n 表示 y 方向的节线数。对圆形镜（旋转对称情况）m 表示径向节线数，即暗环数；n 表示角向节线数，即暗直径数。

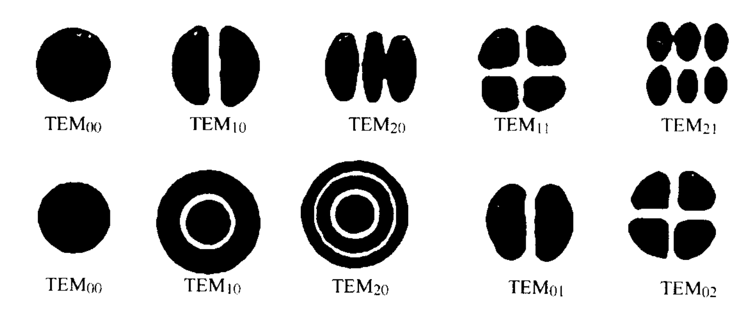


图 5.1-4 方形镜和圆形镜的横模图形

1.3 高斯光束

稳定腔输出的激光束属于各种类型的高斯光束，非稳腔输出的基模光束经准直后，在远场的强度分布也接近高斯型。因此研究高斯光束的有关特性对与激光束有关的光学系统的设计，以及光学谐振腔的工程设计都是很重要的。

无论是由何种结构的稳定腔所产生，沿 z 轴方向传播的基模高斯光束解析表达式可表示为：

$$E(x,y,z)=E_0\frac{\omega_0}{\omega(z)}e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}}e^{-i\left[k\left(z+\frac{r^2}{2R(z)}\right)-\arctan\frac{z}{f}\right]} \quad (5.1\text{-}10)$$

式中

$$\begin{cases} r=x^2+y^2 \\ k=\dfrac{2\pi}{\lambda} \\ \omega(z)=\omega_0\sqrt{1+\left(\dfrac{z}{f}\right)^2} \\ R(z)=z+\dfrac{f^2}{z} \\ f=\dfrac{\pi\omega_0{}^2}{\lambda},\ \omega_0=\sqrt{\dfrac{\lambda f}{\pi}} \end{cases} \quad (5.1\text{-}11)$$

z 轴坐标原点设在光腰处，ω_0 为光腰处的光斑直径，f 为产生高斯光束的共焦腔参数，也称高斯光束的共焦参数，$R(z)$、$\omega(z)$ 分别表示 z 坐标处高斯光束的等相位面曲率半径及等相位面上的光斑半径。

高斯光束的基本性质如下：

1）振幅分布及光斑半径　高斯光束在任一 z 坐标处，其横向振幅分布为高斯分布，从中心向外平滑降落。当振幅降落到中心的 $1/e$ 处，该处到中心的距离定义为光斑半径：

$$\omega(z)=\omega_0\sqrt{1+\left(\frac{z}{f}\right)^2}=\omega_0\sqrt{1+\left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0}\right)^2} \quad (5.1\text{-}12)$$

光斑半径随 z 坐标按双曲线规律变化。在 $z=0$ 处，$\omega(0)=\omega_0$ 为腰斑半径；在 $z=\pm f$ 处，$\omega(\pm f)=\sqrt{2}\omega_0$。

2）等相位面分布　沿高斯光束轴线每一点处的等相位面都可以视为球面，其相对于（0，0，0）点的相移由式中的相移因子决定。曲率半径也随 z 坐标而变，即：

$$R(z)=z\left[1+\left(\frac{f}{z}\right)^2\right]=z\left[1+\left(\frac{\pi\omega_0{}^2}{\lambda\pi}\right)^2\right] \quad (5.1\text{-}13)$$

由上式可以看出：

$z\to\infty$，$R(z)\to\infty$，即离腰无穷远处的等相位面是平面。

$z=\pm f$ 处，$|R(\pm f)|=2f$，这是等相位面曲率半径数值的极小值。

$z>0$ 时，$R(z)>0$，等相位面凸向 z 轴正向。

$z<0$ 时，$R(z)<0$，等相位面凸向 z 轴负向。

$z=0$，$R(z)\to\infty$，即光腰处等相位面是平面。

3）远场发散角　高斯光束的远场发散角的大小为：

$$\theta=2\sqrt{\frac{\lambda}{\pi f}}=\frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \quad (5.1\text{-}14)$$

由此式可见，腰斑越小，发散角越大。

综上所述，高斯光束既不是平面波，也不是一般的球面波。在傍轴近似条件下，可以将它看成是一种曲率中心与曲率半径都随传播过程而不断改变的非均匀球面波，这是因为它的等相位面是球形，但等相位面上的光场振幅分布却是非均匀的高斯分布。

1.4 激光加工材料原理

激光应用的重要基础就是激光与材料相互作用，利用激光与材料相互作用过程中或作用后产生的各种物理、化学和生物效应等，达到应用目的。本书内容侧重于介绍一些相对较为成熟的激光加工技术，如激光淬火、激光切割、激光焊接等，这些技术主要应用激光与材料（尤其是金属材料）相互作用过程中的热效应和力效应达到加工目的，所以本节主要介绍与此相关的一些规律。

1.4.1 激光与材料相互作用的一般规律

激光束照射工件表面，其能量转化要遵循能量守恒定律，即

$$E_0=E_r+E_a+E_p$$

或

$$1=\frac{E_r}{E_0}+\frac{E_a}{E_0}+\frac{E_p}{E_0}=R+\alpha+\psi \quad (5.1\text{-}15)$$

式中，E_r 为被材料表面反射的能量；E_a 为被材料表面吸收的能量；E_p 为被材料表面透射的能量；E_0 为入射到材料表面的总能量。相应的 R、α、ψ 为材料表面对光的反射系数、吸收系数和透射系数。

当激光束用于对金属材料进行热处理时，激光束是不能穿透金属材料的，因此上式中 $E_p=0$，即式（5.1-15）可写成：

$$R+\alpha=1 \quad (5.1\text{-}16)$$

所以激光束照射金属材料表面，入射能量分成两部分：一部分被材料表面反射掉，另一部分被材料表面吸收。当金属表面吸收光能后，将激活晶格点结点原子，进而使光能转化为晶格的热振荡，即光能转化为热能，然后在此基础之上发生其他过程，如从表层向基体方向进行热扩散和热传导完成加热过程，或表层材料气化，结合一些外界条件形成冲击压力波等。

对于各向同性的均匀物质来说，强度为 I 的入射激光在材料中随着深度增加而减弱，设通过厚度为 dx 薄层后，其强度的相对减少量为 dI/I，则 $dI/I\propto dx$，即

$$\frac{dI}{I}=\alpha dx \quad (5.1\text{-}17)$$

式中，α 为吸收系数。设入射到表面的激光强度为 I_0，将上式从 0 到 x 积分，可得激光入射到距离表面深度为 x 处的激



光强度 I 为：

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \qquad (5.1\text{-}18)$$

上式说明两点：

1）随着激光入射到材料内部深度的增加，激光强度将以几何级数减弱。

2）激光通过厚度为 $1/\alpha$ 的物质后，其光强将减少为 $1/e$。这说明材料吸收激光的能力应归结为其吸收系数（α 的常用单位是 cm^{-1}）。

1.4.2　激光加工材料的作用分类

激光加工材料可以有不同的分类方式。根据作用后效果，可分为激光相变硬化、激光熔覆、激光合金化、激光冲击强化、激光冲击成形、激光沉积制备薄膜等。根据作用对象的状态，可分为激光与固体相互作用、激光与液体相互作用、激光与气体相互作用。根据激光加工材料的途径，可以分为热作用、力作用和光作用。由于目前激光在工业中的应用着重于通过热作用或力作用，改善金属材料的性能，所以下面我们将主要介绍激光对固体金属材料的热作用和力作用机理。

1）热作用　在热作用中，激光与金属材料交互作用过程可以分为三个阶段：激光光子直接与表层材料作用阶段，光能转化为表层材料的热能阶段，金属表层材料向基体内部传热阶段。

在激光直接与表层材料直接作用阶段，被吸收的激光能量首先转化为自由电子或束缚电子平均动能的增加，然后再通过电子与晶格或离子的相互作用转化为材料表层的热能。由于光子穿透金属的能力极低，激光与材料直接作用所能达到的深度约为 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ m，金属表层材料可在 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ s 内迅速达到相变温度或熔化温度。上述深度与最终硬化层深度或熔化层深度相比是极小的，上述时间与激光实际辐照时间相比也是极为短促的。因此，在研究激光与金属材料相互作用温度场时，一般忽略研究此阶段，而是假设一个功率密度值等于所吸收的激光功率密度的热源作用于材料表面，在此前提之下，建立温度场模型分析激光处理时的加热和冷却过程。在表层材料向基体内部传热阶段，主要是遵循傅立叶热传导定律而进行的。

利用激光与材料相互作用产生的热效应进行加工的激光技术有激光相变硬化、激光表面熔覆、激光熔凝、激光切割、激光焊接和激光珩磨等。其中激光相变硬化过程中，被加工材料不熔化，在对其进行理论分析时，主要是通过温度场和相变理论相互结合来进行。激光表面熔覆、激光熔凝中，被加工材料已经熔化，其理论研究方法与激光相变硬化思路相同，所不同之处为在建立温度场模型时必须考虑熔化潜热的影响。而激光珩磨技术的应用原理是用激光在工件表面有目的地加工出具有一定角度、宽度（μm 量级）、深度（μm 量级）及密度的沟槽、纹路、凹腔等。在激光珩磨加工过程中，为避免材料发生熔化，出现液相，堵塞加工纹路，材料必须被加热到气化点以上，理论研究目前仍旧以热传导为基础。

2）力作用　在激光的力作用中，激光与金属材料交互作用过程仍旧可以分为三个阶段：激光光子直接与表层材料作用阶段，光能转化为表层材料的热能阶段，金属表层材料吸收热能汽化形成冲击波。

形成冲击波的原因是，作用激光的功率密度超过一定的阈值，且激光作用时间低于某一极限值，表层材料吸收的热能来不及向基体内部传输，因此表层材料在瞬间（$10^{-7} \sim 10^{-10}$ s）加热到其沸点以上，在该层产生爆炸气化，来自蒸气强烈的反冲以及随后的激光把蒸气加热成强烈的等离子体，可以产生反冲冲击波。压力波对材料冲击加载，使表层材料发生动态屈服，形成表层的塑性应变区，在表面造成很高的残余压应力和位错密度，从而改善了材料的性能。这就是力作用改善材料性能的机理。激光冲击强化技术即属于利用力效应加工材料之类。

1.4.3　材料对激光的吸收率

无论是激光对金属材料的热作用还是力作用都必须考虑最初阶段材料对激光的吸收率。材料对激光的吸收率与很多因素有关，主要有激光波长、环境温度、表面涂层和材料本身的状态。

波长越短，材料表层吸收光能效率越高。对于波长为 1.06 μmYAG 激光器，因其波长短，金属材料表面能量吸收率高，在进行激光相变硬化时不需进行预处理；而对于波长为 10.6 μmCO_2 激光器，则需要对表面进行预处理以提高其吸收率。表 5.1-1 中列出了材料表面能量吸收率与激光器波长的关系。

表 5.1-1　材料表面能量吸收率与激光器波长的关系

激光器 材料	Ar^+ λ = 488 nm	红宝石 λ = 6 948 nm	YAG λ = 1.06 μm	CO_2 λ = 10.6 μm
Al	0.09	0.11	0.08	0.019
Cu	0.56	0.17	0.10	0.015
Au	0.58	0.07	0.053	0.017
Ir	0.36	0.30	0.22	—
Fe	0.68	0.64	0.35	—
Pb	0.38	0.35	0.16	0.045
Mo	0.48	0.48	0.40	0.027
Ni	0.58	0.32	0.26	0.03
Nb	0.40	0.50	0.32	0.036
Pt	0.21	0.15	0.11	0.036
Re	0.47	0.44	0.28	—
Ag	0.05	0.04	0.04	0.014
Ta	0.65	0.50	0.18	0.044
Sn	0.20	0.18	0.19	0.034
Ti	0.48	0.45	0.42	0.08
W	0.55	0.50	0.41	0.026
Zn	—	—	0.16	0.027

环境温度越高，吸收率越大。图 5.1-6 所示金属材料在室温时吸收率很小，当温度升高接近熔点时，其吸收率将升高至 40% ~ 50%；如果材料温度接近沸点，其吸收率可高达约 90%。与温度相对应的，如果激光功率大，则材料表面吸

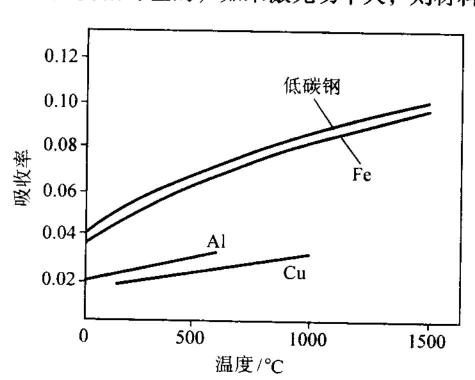


图 5.1-6　某些金属表面吸收率与温度的关系

收的能量也越多，进而材料温度就会越高，这样就形成了激光功率越大，金属的吸收率越高，反之，吸收率越低的现象。另外材料表面粗糙度越大，吸收率越大。

以上从理论上分析了影响材料表面吸收率的因素，以及对应的变化关系。实际生产中不可能用降低表面质量的方法来增加对激光的吸收。由于条件限制通过选择短波长激光来提高表面能量吸收率有时不太现实，所以多数情况下采用在待加工材料表面增加吸收涂层的方法来提高吸收率。涂层不同，吸收率也不同，表 5.1-2 列出了部分涂层的吸收率。

表 5.1-2　不同涂层的吸收率

涂层	吸收率/%
磷酸盐	>90
氧化锆	90
氧化钛	89
炭黑	79
石墨	63

1.5　激光加工的特点

激光是一种独特的能量源，其实质是电磁波（或光子）。尽管电磁波（或光子）也是一种物质，具有质量等属性，但是与宏观的被加工材料相比，激光光子的质量是可以忽略的。另外激光产生的原理决定了激光具有高方向性、高单色性、高相干性和高亮度的特征。激光所具有的这些“四高”特性，使得激光加工具有如下主要特点：

1）相对于传统接触式加工，激光加工属于非接触加工（实际上光子与待加工材料是接触的，但是由于光子的质量相对被加工材料可以忽略），不会像传统刀具加工那样引起工件变形；非接触加工相对于接触式加工来讲，减少了一些由于摩擦等而造成的能量损耗，提高了能量的利用率；另外激光可以通过透明介质对密封容器中的零件进行加工，如透过石英窗口对传感器进行加工，这也是传统接触式加工无法做到的。

2）与传统加工方法相比，激光可以对多种金属、非金属进行加工，特别是可以加工高硬度、高脆性及高熔点的材料（如电子工业中常用的陶瓷材料、硅片等）。

3）与传统的加工方法相比，激光加工不需要制作模具，大大缩短了加工周期，节约成本，特别适合产品快速换型，适应现代市场不断变化的需要。

4）相对于其他特种加工方法，如电子束加工、电火花加工、离子束加工等，激光加工不受电磁场干扰，对工作环境的要求相对较宽。

5）激光加工过程中激光参数如光斑尺寸、功率密度、作用时间等可以精确调整，所以激光加工能进行局部区域加工和难达到区域加工；激光加工热影响区很小，加工后工件变形可以达到很小。

6）激光加工易于实现自动化控制。由于激光加工系统中数控机床、激光器、导光系统、工作台等均易于实现计算机程序控制，因此生产自动化程度较高。

2　激光切割

激光切割是材料激光加工中采用最广泛的一种工艺。它是利用经聚焦的高功率密度激光束照射工件，在超过阈值功率密度的前提下，光束能量以及活性气体辅助切割过程附加的化学反应热能均被材料吸收，由此引起照射点材料温度急剧上升，到达沸点后，材料开始气化，并形成孔洞。随着光束与工件的相对移动，最终使材料形成切缝，切缝处熔渣被一定压力的辅助气体吹除。其切割的原理图如图 5.1-7 所示。

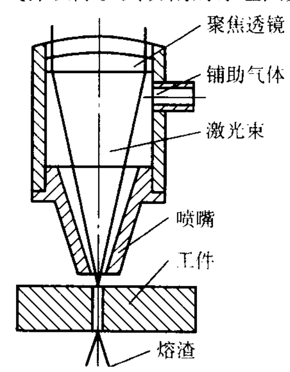


图 5.1-7　激光切割原理图

2.1　激光切割的特性

目前激光切割已是激光加工中发展最为成熟、应用最为广的一种新技术。激光切割总的特点是速度快、质量高、适用范围广，其具体特点概括为：

1）切缝窄，节省材料，还可切割不穿透的盲槽；

2）切割速度快，热影响区小，工件变形小；

3）无刀具磨损，没有接触能量损耗，也不需要更换刀具；

4）光束无惯性，可实行高速切削，且任何方向都可同样切割，并可在任意地方开始切割或停止切割；

5）切缝边缘垂直度好，切边光滑，可直接进行焊接；

6）切边无机械应力，无切屑，切割石棉、玻璃纤维时尘埃极少；

7）可同样方便地切割易碎、脆、软、硬材料和合成材料，也能多层层叠切割纤维织物；

8）能实现多工位操作，易于数控或计算机控制；

9）切割噪声低。

由此可见，激光是一种高质量、快速切割的有效工具，特别对于一些难加工材料，激光切割具有较大的优势。其主要不足之处是切割深度有限和一次性投资较大。

2.2　激光切割的基本原理

激光切割是利用经聚焦的高功率密度激光束照射工件，使被照射处的材料迅速熔化，气化、烧蚀或达到燃点，同时借与光束同轴的高速气流吹除熔融物质，从而实现割开工件的一种热切割方法。其切割过程如图 5.1-8 所示，切割过程发生在切口的终端处一个垂直的表面，称为烧蚀前沿。激光和气流在该处进入切口，激光能量一部分为烧蚀前沿所吸收，一部分通过切口或经烧蚀前沿向切口空间反射。

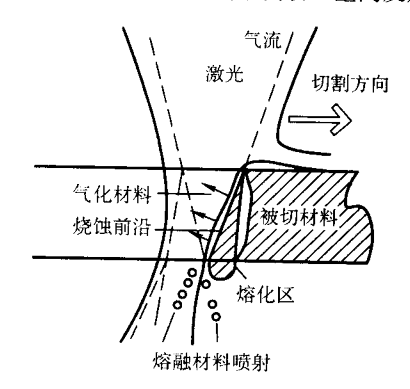


图 5.1-8　激光切割区示意图

从切割各类材料不同的物理形式来看，激光切割大致分



为气化切割、熔化切割、氧助熔化切割和控制断裂切割四类。

1）气化切割　在极高的激光功率密度（10^8 W/cm^2）的光束作用下，工件上将产生很高的温度梯度，由于加热时间极短，物质还来不及熔化时温度已超过材料的沸点温度，因此物质瞬间气化，在切割处气化物质被迅速排开而实现了切割。

气化切割过程中，蒸气随身带走熔化质点和冲刷屑，形成孔洞。气化过程中，大约 40% 的材料化作蒸气逸走，而有 60% 左右的材料则是以熔滴形式被气流驱除的。

2）熔化切割　熔化型激光切割的激光功率密度（大约在 10^7 W/cm^2 左右）也必须大到足以在材料表面产生匙孔，但其熔化物不是靠气化过程清除，而是另外用辅助气流吹除。气体喷嘴常与激光束同心，这种切割不存在蒸气对激光束的反射与吸收问题。这种方法最初主要应用于不能与氧发生放热反应的材料，如铝等，但是，由于激光器件的发展，目前高压无氧切割已成为不锈钢、高温合金等材料切割的主要方法，其特点是切口光洁度高，再铸层小，使用大于 12 MPa 惰性气体或不活泼气体作为辅助气体。

3）反应熔化切割　利用激光束将材料加热到燃点（材料在纯氧中的燃烧温度），然后用能与材料发生放热反应的工业纯氧作为辅助气体，使之发生化学反应，放出的热量为下一层切割提供能量。在切割低碳钢时，钢在纯氧中燃烧所放出的能量占全部热量的 60%，因此这种方法所需激光能量只有气化切割的 1/20。

4）控制断裂切割　控制断裂切割是指通过激光束加热，把易受热破坏的脆性材料高速、可控地切断。这种切割原理可概括为：激光束加热脆性材料小块区域，引起热梯度和随之而来的严重机械变形，使材料形成裂缝。控制断裂切割速度快，只需很小的激光功率，功率太高会造成工件表面熔化，并破坏切缝边缘。目前国外应用该项技术切割汽车工业等使用的钢化玻璃相当成功。

2.3　激光切割过程温度场的数学模型

为了建立数学模型，将钢板的激光切割过程分为两个阶段，激光打孔和激光切割。加工开始时，激光以集中固定点热源的方式照射在钢板的起割点处，钢板吸收激光的能量并转换为热能，由于输入能量大于输出能量，起割点处的温度不断上升，并向周围传热。此时，只有激光的能量作为输入能量，可被看作点热源加热钢板。当温度达到钢材的燃点 970℃后，在辅助气体氧气的参与下，Fe－O 的燃烧反应开始从其中一点处开始，并逐步向周围扩展，由于受到带有一定压力氧气的向下冲击力的作用，以及燃烧反应所产生的熔渣的重力作用，燃烧反应不断向金属下层传播。当燃烧反应将钢板烧穿后，反应物 Fe_3O_4 和 FeO 以及熔融的 Fe 所构成的熔渣被辅助气体从烧透的小孔中吹出，至此切割过程的第一阶段激光打孔结束。从燃烧开始后，激光和 Fe－O 反应的燃烧热作为输入能量可被看作点热源对钢板作用。

当钢板在激光和燃烧反应的共同作用下被烧穿后，激光光源开始以一定的切割速度向前移动。在切割前沿处，由于氧气喷嘴随激光同时移动，燃烧反应所需的氧气很充足，又有激光束作为输入能量在烧穿的小孔内壁不断被反射吸收，加上前一阶段打孔时热传导的预热效果，使得 Fe－O 燃烧反应可以迅速地连续进行。随着切割前沿金属的不断燃烧、熔化和排除，就在钢板上形成了割缝，这一阶段就是激光的切割阶段。在切割过程中，由于切割前沿的割缝处燃烧反应一直进行，在整个板厚上不断有熔渣产生，激光和 Fe－O 反应的燃烧热可被作为线热源处理。

根据热传导微分方程，再代入具体条件，就可以推导出点热源、线热源和面热源的瞬时传热计算公式。

可以考虑在瞬时把点热源的热能 Q 作用在厚大钢板的某点上，假定钢板的初始温度均为 0℃，边界条件不考虑表面散热问题，则在距热源为 R 的某点经 t 秒后，所形成的温度场是以 R 为半径的等温半球面。其相应的传热计算公式为：

$$T=\frac{2Q}{c\rho\ (4\pi at)^{3/2}}\exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right) \tag{5.1-19}$$

式中，Q 为热源在瞬时给钢板的热能；R 为据热源的坐标距离，$R=(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$；t 为传热时间；c 为被加工材质的比热容；ρ 为被加工材质的密度；a 为被加工材质的热扩散率。

在厚度为 h 的无限大薄板上，当热源沿板厚方向热能均匀分布作用于钢板上某处时，即相当于线热源。假设钢板的初始温度为 0℃，不考虑钢板与周围介质的换热问题，则距热源为 r 的某点，经 t 秒后，由于没有 Z 向传热，所形成的温度场是以 r 为半径的平面圆环。其传热计算公式为：

$$T=\frac{Q}{4\pi\lambda ht}\exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \tag{5.1-20}$$

式中，$r=(x^2+y^2)^{1/2}$。

在瞬时之内把热能 Q 作用在断面为 F 的工件上，即相当于面状热源传热，同样也假设工件的初始温度为 0℃，边界条件不考虑散热，则距热源中心为 x 的某点，经 t 秒后该点的温度可用下式运算求得：

$$T=\frac{Q}{c\rho F\ (4\pi at)^{1/2}}\exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right) \tag{5.1-21}$$

以上是根据最简单的情况，利用数学分析法解出不同情况下瞬时集中点热源、线热源和面热源作用后，经 t 秒后某点的温度计算公式。这些公式能够定性地反映传热的实际情况。但是，由于这些计算公式的原始假设条件的局限性，故不能完全定量地确定温度，只能作为定性估算。

根据前面的分析，在激光切割加工的第一阶段打孔过程中，激光以及 Fe－O 燃烧热作为热源应属于点状连续固定热源。此时可以认为热源在 t 时间内是由无数个瞬时热源作用的总和，其作用结果应等于各个瞬时热源独立作用时使计算点温度变化的累积。则在瞬时热能为 dQ（$dQ=q dt'$）的热源连续作用 Δt 时间（$\Delta t=t-t'$），距热源为 R 的某点将产生 dT 的温度变化。再把无数个瞬时热源的作用积分，即可求出连续固定点热源作用 Δt 时间后该点的温度。

$$T(R,t)=\int_0^t\frac{2q\,dt'}{c\rho[4\pi a(t-t')]^{3/2}}\exp\left[-\frac{R^2}{4a(t-t')}\right] \tag{5.1-22}$$

对上式积分运算后，可得：

$$T(R,t)=\frac{q}{2\pi\lambda R}\left[1-\phi\left(\frac{R}{\sqrt{4at}}\right)\right] \tag{5.1-23}$$

式中，$\phi(u)$ 或然率积分函数，可通过查表得到。

根据前面的分析，在激光切割的第二阶段切割过程中，激光以及 Fe－O 燃烧热作为热源应属于线状连续快速移动热源。当激光以一定功率照射钢板时，开始一段时间内，温度场中的各点随时间的变换而变化，属于不稳定温度场；在钢板板厚方向基本烧穿后，温度场就逐渐达到了饱和状态，形成了暂时稳定温度场，又可称为准稳定温度场。此时钢板上割缝周围的温度场虽然会随时间而变化，但随着激光束的移动，可发现这个温度场与热源以同样的速度跟随移动。如果采用移动坐标系，坐标的原点与热源的中心相重合，则钢板上各点的温度值取决于系统的空间坐标，而与时间无关。

由于热源的移动速度通常都大于 2 m/min，而且激光切割的热影响区很小，因此可以认为在热源产生的准稳态温度场范围内，在瞬间热源就由一端移到了另一端，如同一个细

长的热源瞬时作用在工件上。又因为热源移动得很快，可以认为在热源移动的轴线上不存在温度梯度，只在该轴线的垂直方向上有热的传播过程。

为了便于分析，现将图5.1-9所示的薄板上截取 *ABCD* 与 *abcd* 之间的截片之后，就如同一个面状瞬时热源作用在方形的细棒上。X_0 即为热源移动的轴线方向，其中热源有效功率为 q，速度为 v，薄板厚度为 h。则工件上某点经 t 秒后的温度计算公式可利用面状瞬时热源的传热公式得到。

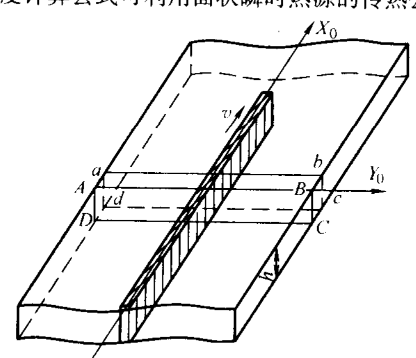


图5.1-9　移动线热源作用在薄板上的传热模型

$$T(y_0,t)=\frac{q}{vh(4\pi\lambda c\rho t)^{1/2}}\exp\left[-\left(\frac{y_0^2}{4at}\right)\right] \qquad (5.1\text{-}24)$$

式中，y_0 为距热源运行轴线的垂直距离。

根据上面对激光切割过程的理论分析和建立的数学模型，就可以利用计算机的计算能力，模拟出激光切割过程中工件在 t 时刻某点处的温度、颜色、状态等的变化。

可以看出影响激光切割的参数很多，其中一些内部因素 k、ρ、c、λ 等在加工过程中变化比较小，可作为常数处理。而外部因素 v、h 等在加工过程中经常会发生变化，进而影响激光切割的加工效果。

2.4　激光切割零件的尺寸精度

在一般材料的激光切割过程中，由于切割速度较快，零件产生的热变形很小，切割零件的尺寸精度主要取决于切割设备的数控工作台的机械精度和控制精度。

在脉冲激光切割加工中，采用高精度的切割装置与控制技术，尺寸精度可达微米量级。表5.1-3为 CO_2 脉冲激光切割SK3高碳钢时的尺寸偏差。

表5.1-3　CO_2 脉冲激光切割SK3高碳钢时的尺寸偏差

试样尺寸/mm	实测的尺寸偏差/μm	试样的尺寸分散度/μm
矩形 79.0×45.0	50以下	±10以下
圆孔 ϕ4.7	80以下	±30以下

切割参数：脉冲峰值功率450 W；脉冲脉宽比48%，脉冲频率400 Hz；切割速度0.5 m/min。

在连续激光切割时，零件的尺寸精度通常在±0.2 mm，个别的达到±0.1 mm。

目前国际上对激光切割的质量评价还没有一个统一的标准，我国尚无有关激光切割面质量的标准，日本也无专用标准，检测激光切割质量的主要依据引用部分JIS和WES（焊接规格）等。CEN（欧洲标准化机构）和ISO（国际标准化机构）讨论了有关激光切割的标准化问题。以EU为主的提供的有关ISO 9000系列质量保证方法，具体研究了激光切割的详细标准和对标准试件的规定。其内容包括有关切割质量的等级划分、设定样品的标准、加工样品的标准、价格样品的机种、详细的光学系统、振动器及光束特性等。

激光切割的切口质量要素示意图如图5.1-10所示，主要体现在切口宽度、切割面的倾斜角以及切割面的粗糙度等方面。

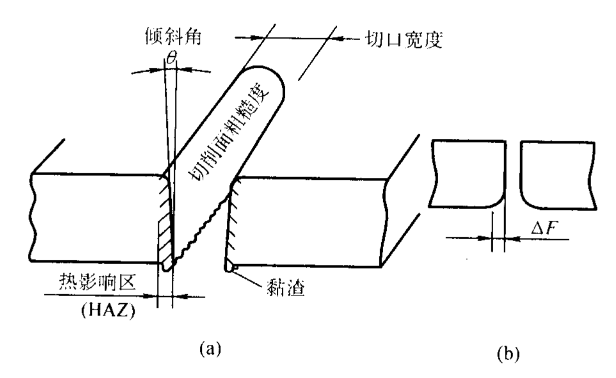


图5.1-10　激光切割的切口质量要素

1）切口宽度　激光切割金属材料时的切口宽度，同光束模式和聚焦后的光斑直径有很大的关系，CO_2 激光束聚焦后的光斑直径一般在0.15～0.3 mm之间。激光切割低碳钢薄板时，焦点一般设置在工件上表面，其切口宽度与光斑直径大致相等。随着切割板材厚度的增加，切割速度下降，就会形成上宽下窄的锲形切口，如图5.1-10a所示，且上部的切口宽度也往往大于光斑直径。一般说来，在正常切割时，CO_2 激光切割碳钢时的切口宽度约为0.20～0.3 mm。

2）切割面的倾斜角　在激光切割厚金属板材时，切口会呈现出上宽下窄形，有时在下口面也出现倒V形，如图5.1-10b所示。工件切割实验表明，切割面倾角的大小同切割方向有关，但一般都在1°以内，基本上看不出明显的倾角。

在 CO_2 切割不锈钢板时，为避免黏渣，焦点位置通常设在表面以下部位，因而其倾角比碳钢切割略大，即使在不锈钢薄板场合也出现倾斜的切割面。在激光切割功率密度 $P_0=3\times10^6$ W/cm² 的条件下，切口下缘的倒V形塌角量 ΔF（μm）与板料厚度 t 的关系可以下式近似表示：

$$\Delta F\approx(10\sim25)\ t \qquad (5.1\text{-}25)$$

当 P_0 增大，ΔF 值就减小。因此采用高功率密度的激光束切割时，ΔF 值就不明显。

3）切割面的粗糙度　影响切割面粗糙度的因素较多，除了光束模式和切割参数外，还有激光功率密度、工件材质和厚度。对于较厚板料，沿厚度方向切割面的粗糙度存在较大差异，一般上部小，下部粗。在用激光功率1 kW切割低碳钢的场合，当 $P_0\geqslant3\times10^6$ W/cm² 时，切割面粗糙度 R_z（μm）可用下式估算：

$$R_z\approx(3\sim5)t \qquad (5.1\text{-}26)$$

表5.1-4为3 kW的 CO_2 激光切割低碳钢中厚板时切割面的最大粗糙度的实测数据，从中看出切割面粗糙度随板厚的差别。

表5.1-4　3 kW CO_2 激光切割低碳钢中厚板时切割面的最大粗糙度

板厚/mm		9	12	16	19	平均值
上	μm	11.0	15.1～88	17.32	25.96	17.04
中	μm	11.72	19.48	20.72	29.64	20.39
下	μm	17.76	25.56	45.1～16	54.16	37.66
平均值/μm		15.1～49	25.1～97	27.07	35.58	25.03

切割参数：激光功率：3 kW；辅助气体：O_2，0.37～0.47 MPa；离焦量：+0.5 mm。



2.5　激光切割的质量及影响因素

激光切割的质量要求主要指以下几个方面：

1）切缝入口处轮廓清晰、明显；

2）切缝窄；

3）切边热损伤最小；

4）切边平行度好；

5）无切割黏渣；

6）切割表面光洁。

而影响激光切割质量的主要因素有光束特性、材料特性以及切割工艺参数。

2.5.1　光束特性

影响激光切割质量的主要光束特性有以下五方面。

1）激光功率　从理论上讲，激光功率的大小对同种材料来说，是与能加工材料的厚度或者是加工速度呈正比的，但是由于辐射、对流和传导热损失，以及光束的焦深的限制，厚材料的加工并非激光切割的优势，因而目前国际、国内最常用的激光切割机功率在 2 000 W～6 000 W 之间，视用途及价格而定。

2）激光波长　最常用的激光切割机是快速轴流的 CO_2 激光器，其波长为 10.6 μm，其优势在于可以加工大多数的金属与非金属材料，设备成熟，功率高，一直以来几乎独占切割机市场。但是随着固体 YAG 及半导体激光器的发展，这种方式已开始打破，如 YAG 激光器，由于其 1.06 μm 波长对金属的吸收率远高于 CO_2 激光器，并且可用光纤传输，因而在金属零件的加工中具有优势，特别是在精密零件的切割中，切缝宽度可达 0.05 mm。

3）光束模式　光束模式与它的聚焦能力有关，与机械刀具的刃口尖锐度有点相似，最低阶模是 TEM_{00}，光斑内能量呈高斯分布，目前最常用激光切割机的能量分布为准基模。在近几年也有激光切割机厂商使用板条的 CO_2 激光器，其光束模式为 TEM_{00}，在薄板切割中具有优势，但对厚板来说，由于切缝太窄，排渣困难，因而准基模在目前仍是激光切割光束模式的主流。

4）聚焦光斑　根据衍射理论，聚焦光斑直径 D 可以由下式计算，

$$D = 2.4\ F\lambda$$

对切割常用的 CO_2 激光束来说，$D = 25.4F$（μm）。这里 D 指功率强度下降到 $1/e^2$ 中心值时的光斑直径；F 是所用光学系统的 F 系数，对双凸透镜，它等于焦长与入射光束直径之比。与光斑尺寸相联系的焦深 Z_s，指焦点上、下沿光轴中心功率强度超过顶峰强度 1/2 的那段距离：

$$Z_s = \pm 4 \times 1.39\ \left(\frac{\lambda L^2}{2\pi a^2}\right) = \pm 4 \times 1.39\ \left(\frac{2\lambda}{\pi} \times F^2\right) \tag{5.1-27}$$

式中，λ 为波长；L 为透镜焦长；$2a$ 为束斑直径；F 为系数即 $L/2a$。

而实际获得的光斑尺寸约为计算理论值的 4 倍左右，按光束模式、导光系统和孔径不同，它也有所变化。从式中可以看出，对一定波长的激光器来说，聚焦透镜的焦长越短，F 值越小，光斑尺寸和焦深也越小。

5）光束偏振　几乎所有用于切割的高功率激光器都是平面偏振，在表面处理和焊接领域，光束的偏振问题并不重要，但在切割过程中，光束在切割面上不断反射，如果光束沿着切缝方向振动，光束能被更好地吸收。同时光束偏振对切缝质量密切相关，在实际切割中发生的缝宽、切边粗糙度和垂直度变化都与光束偏振有关。因而在一般切割系统中，采用控制光束成为圆偏振方式来获得均匀一致的高质量切缝。

2.5.2　材料特性

影响切割性能最重要的材料参量是材料对激光辐射的吸收率，其次是它的热导率和热膨胀系数。此外，材料密度、比热和气化潜热也有相当影响。根据这三项基本性能，可对材料进行分类，如表 5.1-5 所示。

表 5.1-5　材料对激光辐射的吸收性能

材料						
低吸收率——金属			高吸收率——非金属			
Ⅰ不充分吸收	Ⅱ充分吸收		Ⅲ有机		Ⅳ无机	
	高熔点	低熔点	热抗性为 0	热抗性大于 0	高膨胀系数	低膨胀系数
金、银、铜、铝、黄铜	钨、钼、铬、钽、钛、锆	铁、镍、锡、铅	丙烯酸、聚丙烯、聚四氟乙烯、聚甲烯及其氧化物、聚丙烯、聚碳酸酯、橡胶（合成）	聚氯乙烯、胶合材料、皮革、木材、橡胶、羊毛制品、棉织品	玻璃	陶瓷、石英、刚玉、瓷器、石棉、云母、天然石块

表 5.1-5 中，Ⅰ类材料即金、银、铜、铝等，是对 CO_2 激光束不充分吸收的金属材料，能否利用 CO_2 激光进行切割，取决于是否有足够的起始功率，以形成为获得穿透效果需要的初始小孔，它们一般需要 3.5 kW 以上的功率才能成功。在加工时可优先选择对其吸收率高的 YAG 激光器进行切割。Ⅱ类材料的切割应用较多，对 CO_2 激光束具有高吸收率，在低功率下也能顺利进行切割。某些材料，如Ⅳ类中的玻璃，切割过程中有开裂倾向，因此需要进行特殊的处理，如预热或切后热处理等。

2.5.3　激光切割工艺参数控制

影响激光切割质量的工艺参数很多。激光切割的一个重要优点就是对其中的主要因素可实行高度控制，使切割工件充分满足客户要求，并且重复性很好。这些主要因素由以下工艺参数构成。

1）切割速度　对给定的激光功率密度和材料，切割速度符合于一个经验公式，只要在阈值以上，材料的切割速度与激光功率密度成正比，即增加功率密度可提高切割速度。这里所指的功率密度不但与激光输出功率有关，而且与光束质量有关。另外，光束聚焦系统的特征，即聚焦后的光斑大小也有影响。同时，切割速度与被切材料的密度和厚度成反比。

当其他参数保持不变，提高切割速度的因素有：提高功率，改善光束模式，减小聚焦光斑直径等。

对金属材料切割来说，在其他工艺参数保持恒定情况下，激光切割速度可以有一个相对调节范围而仍能保持较满意的切割质量，这种调节范围在切割薄金属时显得比厚件稍



宽。切割速度太快，会造成切割不透；而切割速度太慢，材料发生自燃，热影响区增大，也可导致排出热融材料烧蚀切口表面，使切面很粗糙。

2）焦点位置　由于激光功率密度对切割速度及质量影响很大，而聚焦透镜的焦距对聚焦光斑的大小以及焦深有很大影响，一般在切割薄板时，选择短焦距的透镜，有利于切割速度及质量；而对厚板，则尽量选择长焦镜片，可以保证切缝的垂直度。而由于对任何透镜来说，焦深是有一定限制的，因而相对于更换镜头来说，焦点位置的选择和保持是激光切割中的一个更重要的问题。在一般的切割过程中，视加工零件的厚度，选择置焦点位置在材料表面或向下 1 ~ 2 mm 处。而为了保证在切割过程中保持焦点的位置，激光切割机一般配有传感器，这些传感器包括电容传感器、电感传感器以及机械传感器。

3）辅助气体压力　一般情况下，材料切割都需要使用辅助气体，问题主要牵涉到辅助气体的类型和压力。通常，辅助气体与激光束同轴喷出，保护透镜免受污染并吹走切割区底部熔渣。对非金属材料和部分金属材料，使用压缩空气或惰性气体清除熔化和蒸发材料，同时抑制切割区过程燃烧。

而对大多数金属激光切割则使用活性气体（主要是氧气），炽热金属发生氧化放热反应，这部分附加热量可提高切割速度 1/3 ~ 1/2。

在确定辅助气体前提下，气体压力大小是极为重要的因素。当高速切割薄型材料时，需要较高的气体压力以防止切口背面黏渣。当材料厚度增加或切割速度较慢时，则气体压力宜适当降低。为了防止塑料切边霜化，也以较低气体压力切割好。

激光切割实践表明，当辅助气体为氧时，它的纯度对切割质量有明显影响，氧纯度降低 2% 会降低切割速度 50%，并导致切口质量显著变坏。

随着低阶模 CO_2 激光器功率的提高，目前激光切割机一般具有高压无氧切割系统，辅助气体使用氮气或惰性气体，压力达到 12 MPa 以上，主要用于不锈钢、高温合金等材料的切割，切口表面几乎无再铸层和热影响区。

4）激光输出功率　工件厚度一定时，激光功率随切割速度的要求而增加，切割速度越快，要求的激光功率越高。在激光功率一定时，切割速度与工件厚度成反比，工件越厚，切割速度越慢，热影响区也相应增大。

2.6　常用工程材料的激光切割

2.6.1　金属材料的激光切割

虽然几乎所有金属材料在室温对红外光能量都有很高的反射率，但波长为 10.6 μm 光束的 CO_2 激光器还是成功地应用于许多金属的切割中。金属对 10.6 μm 激光束的起始吸收率只有 0.5% ~ 10%，但是，当功率密度超过 10^6 W/cm^2 的聚焦激光束照射到金属表面时，却能在微秒级时间内很快使表面开始熔化，而处于熔融态的大多数金属吸收率急剧上升，一般可提高到 60% ~ 80%。常用金属材料的激光切割特性见表 5.1-6。

表 5.1-6　常用金属材料的激光切割特性

材料	激光切割特点
碳钢	一般情况下，15 mm 以内（视激光器而定）的碳钢可进行氧助激光切割，切缝窄，效果良好。板厚最小可至 0.1 mm 上下，其热影响区小，特别对低碳钢，几乎可不予考虑。碳钢的切缝光滑，清洁而平整。镀锌或涂塑薄钢板，使用激光切割速度快，变形小，节省材料，目前在汽车行业比较通用

续表 5.1-6

材料	激光切割特点
不锈钢	激光切割对利用不锈钢薄板作为主构件的制造业来说是有效的加工工具。根据切割质量的要求及不锈钢种类的不同，可以选择氧辅助切割或者高压无氧切割。对奥氏体不锈钢来说，钢中大量镍元素的存在影响光束能量在材料中的耦合和传输。尤其是切割过程中熔融态镍的黏度较高会引发熔渣黏附在切割背面，因而常采用高压无氧切割；对不含镍的马氏体不锈钢和铁素体不锈钢而言，激光切割则可根据要求选择辅助氧切割，可获得清洁、光滑的切边质量。图 5.1-11 和图 5.1-12 分别为激光切割不锈钢速度与辅助气体及厚度的曲线
合金钢	大多数合金结构钢和合金工具钢都能用切割方法获得良好的切边质量，在激光切割的厚度范围内，只要工艺参数控制得当，要获得平直、无黏渣切边并不十分困难；但对含钨的高速工具钢和热模钢，激光切割时应使用高压无氧切割，从而获得清洁切口
铝及其合金	铝合金切割所用辅助气体，主要用来从切割区吹掉熔融产物，通常可获得较好的切口质量。对某些铝合金来说，要注意预防切缝表面晶间微裂纹的产生。铝合金的 CO_2 激光切割需要很高的功率密度以克服它对 10.6 μm 波长光束高反射率的阻碍形成初始孔洞。一旦孔洞生成，它将像钢一样极大地提高对光束的吸收率。所以，要用高功率的 CO_2 激光束对铝及其合金进行切割，可采用一些辅助措施，防止反射光对激光系统的破坏，如在加工表面涂覆吸收层或者略作倾斜等。当然如果使用 YAG 激光器进行铝合金的切割更具优势
铜及合金	纯铜（紫铜）由于对 CO_2 激光波长反射率太高，基本上不能使用 CO_2 激光切割。黄铜使用高功率可切割，但切割质量比其他金属略差
钛及合金	纯钛能很好耦合聚焦激光束转化的热能，辅助气体采用氧时化学反应激烈，切割速度快，但易在切边生成氧化层，不小心还会引起过烧。因而在钛和钛合金的切割中，一般采用惰性气体的氩气作为辅助气体，这样可获得清洁、无氧化的切口
高温合金	对镍基或钴基等高温合金的切割，为了获得高质量的切口，目前多采用高压无氧切割。图 5.1-13 为利用高压氮气作为辅助气体的激光切割 Hastalloy - X 合金切口的微观图

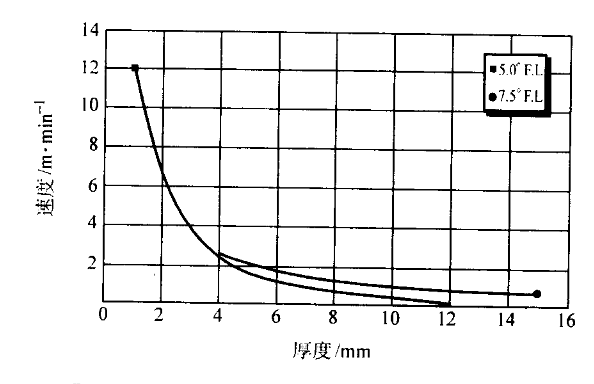


图 5.1-11　激光切割不锈钢速度与厚度功率的曲线

（PRC3500 激光器，氧辅助气体切割）

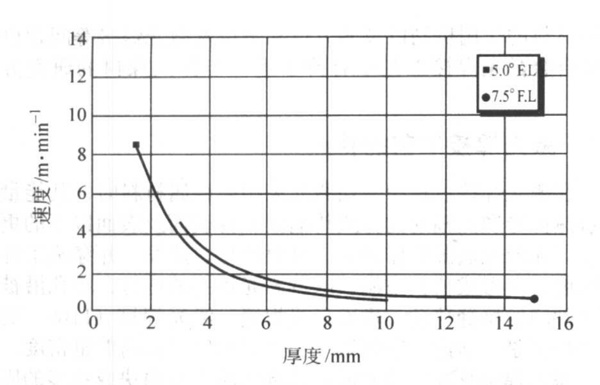


图 5.1-12　激光切割不锈钢速度与辅助气体及厚度功率的曲线
（PRC3500 激光器，高压氮气辅助气体切割）

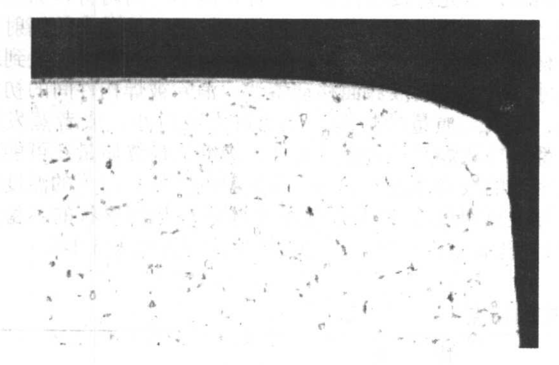


图 5.1-13　激光切割 Hastalloy - X 合金切口的微观图

2.6.2　非金属材料的激光切割

CO_2 激光束很容易被非金属材料所吸收，导热性不好和低的蒸发温度又使吸收的光束能几乎全部输入材料内部，并在光斑照射处瞬间气化，形成起始孔洞，进入切割过程的良性循环（见表 5.1-7）。

表 5.1-7　常用非金属材料的激光切割特性

材料		激光切割特点
有机材料	木材	激光切割木材有两种不同的基本机制：瞬间蒸发和燃烧。激光切割木材取决于切割时功率密度的大小，瞬间蒸发是木材切割较理想的切割机制。激光能有效切割木材、层压板和木屑板，可切割任何图形，切口精细，切边没有撕切和绒毛，这都是通常的锯切工艺所不能比拟的，切边略呈碳黑。目前激光切割包装业所用模切板已成为国内一个新型产业
	塑料	激光作为强热源，利用其高能量密度可气化胶合剂，很快地破坏聚合体材料聚合链，从而顺利实施对塑料的切割。试验证明，低熔热塑料切割只要控制工艺就可获得无毛刺的底边，切缝光滑、平整，边缘是由重熔凝固造成。对高强度塑料，由于需要较高的功率密度以破坏其连接强链，切割中经常会有燃烧发生，使切边产生不同程度的炭化。 新的轻质纤维增强塑料用常规的切割工具很难加工，可在层叠固化前用激光切割薄片。但对固化后的厚断面工件，特别是像硼及碳纤维一类材料，激光切割也较困难
	橡胶	一般来说，20 mm 以下的天然与合成橡胶都可在聚焦激光束加热下气化而切断，它既无结构变形，切边附近也不会发生硫化作用，切缝精确，切割速度高。橡胶切割时要控制工艺参数防止切边发黏，对某些材料，特别是含炭黑的橡胶，切割后需要清理切边边缘的碳化

续表 5.1-7

材料		激光切割特点
有机材料	纸	激光切割纸张质量高，切边光滑、结实、坚固，可以完全避免机械切边强行拉开纤维而变毛糙的缺点。只要控制好工艺变量，激光切纸的切边不会出现焦斑
	布料、纤维	布料单层切割的切割速度可高达 20 m/min 以上，也可层叠切割，其层叠厚度可超过 50 mm。激光切割布料的主要优点是无碎片和尘埃，切割某些合成纤维时，还会自行热封边
无机材料	陶瓷	陶瓷材料由于导热性差和几乎没有塑性，因此一般的冷、热加工都很困难。根据陶瓷的种类不同，激光切割陶瓷的模式也不同，可采用可控导向断裂，此时必须使用较小的输出功率；有些陶瓷的切割则是使用高功率，如氮化硅等
	石英	熔融石英热膨胀系数较低，对激光切割适应性好，虽然切缝附近有热影响区，但切边质量好，无裂纹，切面光滑，不需再进行辅助清理，切速远超过锯切，且工件不承受任何冲击力，切缝窄。而单晶石英的激光切割易产生裂纹
	玻璃	激光束瞬间加热使玻璃气化，在辅助气体作用下，部分熔融态玻璃被吹掉，从而实现切割作用。对于热膨胀系数低的玻璃，在适当的预热热循环措施下，可进行激光切割。但对大多数玻璃（包括钠钙玻璃），在热冲击下易产生裂纹，并沿切边扩展。目前有一种新的方法用于玻璃的激光切割
复合材料		新型轻质加强纤维聚合体复合材料很难用常规方法进行加工。利用激光无接触加工特点可以对固化前的层叠薄片高速进行切割修剪，在激光束加热下，薄片边缘被融合，避免了纤维屑生成 对完全固化后的厚工件，尤其是硼纤维和碳纤维合成材料，激光切割要注意防止切边可能会有碳化、分层和热损伤发生 正如塑料切割一样，合成材料切割过程中要及时排除废气 还有一种复合材料是单纯由两种性能不同的材料上下复合在一起，为了获得较好的切割质量，激光切割总的原则是先切割具有较好切割性能的那一面

3　激光焊接

3.1　概述

高新材料的应用通常需要优异的焊接技术，新材料的开发研制应与其焊接性能的研究同步开展。众所周知，激光焊接工艺有两大缺点和难题，即很高的成本投入和较低的能量转换效率。然而，激光焊接有许多优势所在，如热源的光路操纵容易，控制简单，工件变形小，热影响区狭窄，精确性和自动化程度高，大多数情况下不需要真空工作室等激光焊接的这些优点足以弥补其不足。在近 20 年中，高功率连续波形（CW）CO_2 气体激光器（波长为 10.6 μm）和固体 Nd:YAG（掺钕 - 钇铝石榴石晶体）激光器（波长为 1.06 μm）的发展使得激光束作为热源的加工应用日趋增多和普遍，应用领域包括切割、焊接、热处理、软钎焊、硬钎焊、复层焊接、表面硬化及处理等。目前，几乎所有用于焊接和热处理的固体 Nd:YAG 激光器都与光导纤维系统组合使用，具有革新性的光纤传送系统与 Nd:YAG 激光器的结合大大增加

了激光加工系统的方便性与灵活性，这种组合系统对于工业上的多工作台同时加工以及机器人或机械手的操纵非常理想。而且 Nd：YAG 激光器比 CO_2 激光器更适合于焊接高反射率材料（如铜合金和铝合金等），这是由于 Nd：YAG 激光具有相当短的波长（1.06 μm），从而可获得较高的功率密度。值得注意的是，对于相同的平均功率，脉冲（PW）Nd：YAG 激光由于具有更高的脉冲峰值功率，因而比连续（CW）Nd：YAG 激光可获得更大的熔深。

激光焊接能够实现多种材料的连接，能够连接航空与汽车工业中比较难焊的薄板合金材料，如铝合金与钛合金等，并且构件的焊接变形小，焊接接头质量高，重现性好。在汽车工业中已经比较完善地建立起了特制壳体激光焊接生产线，为了减轻航空结构件的重量，激光焊接铝合金及钛合金蒙皮薄板的制造生产线正在开发研制之中。另外，激光具有能够实施局部微小范围加热的特性，使其非常适于印刷电路板一类的电子器件的焊接，激光能在电子器件上非常小的区域内产生很高的平均温度，接头以外的区域则基本不受影响。

对于钛合金的激光焊接，焊接接头高温区域的气体保护和工件的焊前清理是保证焊接质量和焊接接头性能的关键环节。除此之外，钛合金激光焊接过程的稳定性、激光焊接的工艺优化、各种工艺因素对焊接质量的影响、等离子体对激光能量的吸收特性、小孔的形成机制、短脉冲高峰值功率激光与材料的作用机制以及多方位和全位置激光焊接等问题也是钛合金激光焊接工艺中有待于进一步深入探讨的研究方向。

3.2 激光焊接工艺的特点

在激光焊接过程中，当激光束照射金属材料时，其能量通过热传导和热辐射的方式传输到工件表面及表面以下的更深处。在激光热源的作用下，材料熔化、蒸发，并穿透工件的厚度方向形成狭长空洞，随着激光焊接的进行，小孔沿被焊工件间的接缝移动，进而形成焊缝。激光焊接（LBW）的显著特征是大熔深、窄焊道、小热影响区以及高能量密度。

激光焊接是在空间有限的局部区域连接两块或更多的固体材料，使工件加热熔化，形成熔池，并保持稳定直至凝固。同时，激光焊接也代表着一种在微小区间内材料加热与冷却之间的精细平衡。激光焊接的目的是通过激光的辐射和被焊材料对激光能量的吸收产生液态熔池，并使之长大到理想尺寸，然后沿固液界面移动熔池，消除被焊构件间的初始缝隙，形成高质量的焊缝。熔池过大或过小，或者蒸发严重，都将导致焊接的失败。此外，焊缝的最终质量还可能因其他因素的改变而恶化，如合金组分的蒸发，过大的温度梯度（导致热裂纹），以及焊接熔池体积与几何形状的不稳定（导致气孔和空穴）等。激光焊接工艺特点见表 5.1-8。

表 5.1-8 激光焊接工艺的特点

项　目	特　点
焊前准备	要求较高，尤其是对于活性较大的金属或合金材料（如钛合金、锆合金和铝合金等），需要对焊件进行全面细致的清理，以避免发生污染和在焊接接头表面及内部形成焊接缺陷
被焊工件的焊前装配	对于厚件的焊前装配要求较低，而对薄板材料有严格的精度要求，即要求激光束在工件表面上的位置不能有明显偏移，以保证激光束与焊缝对中的准确性和良好的焊接质量，并避免产生焊接缺陷。当对焊缝质量有很高要求时，经常采用特殊的专用焊接夹具
焊接速度	通常具有较大的调整范围，最高可达 20 ~ 25 $m \cdot min^{-1}$
焊接能量（功率）密度	激光束聚焦后，焦点处的功率密度相当高，比其他焊接方法高出几个数量级，可与电子束焊接工艺比拟，而且当输入能量相同时，激光焊接比电子束焊接方法在焦点处具有更高的能量密度，几乎可以熔化并气化所有材料
焊接线能量的适应性	适应的板厚范围大，而且线能量越大，适应的板厚范围越大
焊接工艺参数的可调性	方便简单，并可实现预置和焊接过程中的自动调整
焊接过程的自动化程度	较高，既可采用自动行走机构，又可实现机器人操作
对焊接环境和焊接条件的要求	既能在室温也能在特殊的条件下进行焊接，如激光束可通过电磁场而不发生偏移；若对被焊工件的保护没有特殊要求，则激光可在真空、大气或某些特定的气体环境中施焊，并能透过玻璃或其他对光束透明的材料进行焊接
对不同材料的适应性	可焊接各种难熔材料，如钛及钛合金、钨和石英等，并能焊接异种材料，焊接效果良好
对微型焊接的适应性	激光束经聚焦后可获得很小的焦斑尺寸，且能精密定位，因此可应用于微、小型元器件的组焊，不仅大大提高了生产效率，而且焊接热影响区小，焊点无污染，焊接质量优异
能量转换效率	很低，一般为 3% ~ 15%
焊接生产率	很高
焊接部位	可采取单道焊接多层复合板材与难以接近或其他焊接方法难以达到的部位，实施非接触远程焊接，具有很大的灵活性
光束传输	Nd：YAG 激光波长较短，可采用光纤传输，且传输效率很高（大于 90%），从而使激光焊接技术获得了更加广泛的推广与应用
时空分光	激光束容易实现按时间与空间的分光，能进行多工位及多光束同时加工，为更精密和高效的激光焊接提供了有利条件





续表 5.1-8

项　　目	特　　点
多方位与全位置焊接	采用 Nd：YAG 激光器与机器人相结合，可实现全位置焊接
焊接坡口	对于厚度不大于 20 mm 的板材，通常无需开坡口，即可实现一道焊缝的单面焊双面成形
焊接接头的设计	能够适应多种形式的接头，并可实现不同板厚和材料的焊接
焊缝成形	可形成深而窄的焊缝，焊缝成形优异，通常无需再加工
焊缝深宽比	进行高功率焊接时，焊缝深宽比通常大于 5，最高可达 10～15
焊接变形	焊接热变形与焊后变形均很小，但薄板的变形机理与变形的校正尚有待于深入研究
焊接热影响区（HAZ）	非常狭窄
焊接接头的冶金特征	无严重的晶粒长大现象
填充材料	多数情况下无需在焊缝中填充焊接材料，降低了材料成本
设备成本与操作成本	一次性投资较大，操作成本也较高

激光焊接有两种基本焊接方式，即热导焊与深熔焊，这两种方式最根本的区别在于，前者的熔池表面保持封闭，而后者的熔池则被激光束穿透成孔。

3.3　激光焊接的分类

根据激光对工件的作用方式或激光束输出方式的不同，可以把激光焊接分为脉冲激光焊接和连续激光焊接。前者形成一个个圆形焊点，后者形成一条连续的焊缝。脉冲焊接时，输入到工件上的能量是断续的、脉冲的。脉冲激光焊中大量使用的脉冲激光器主要是 YAG 激光器，YAG 激光器适用的重复频率宽。此外还可以将连续输出的 YAG 激光器和 CO_2 激光器用于脉冲焊接，最简单的办法就是打开或关闭装在激光器上的光闸。

根据实际作用在工件上的功率密度或激光焊接时焊缝的形成特点，又可以把激光焊接分为热传导焊接和深熔焊接（小孔激光焊接）两类。热传导激光焊的激光功率密度较低，一般小于 10^5 W/cm^2；而深熔焊接功率密度较大，一般大于或等于 10^5 W/cm^2。

热传导焊接时，工件表面温度达不到材料的沸点，光束不能通过熔化金属直接加热下层固态金属，下层吸收的光能转变为热能后，通过热传导将工件加热熔化，形成的焊缝类似氩弧焊焊缝，无小孔效应，焊接过程与非熔化极电弧焊相似，熔池形状近似为半球形。其使用的激光功率密度低，熔池形成时间长，且熔深较浅，多用于小型零件的焊接。

深熔焊接时，使用的激光密度较高，激光辐射区金属的熔化速度快，金属表面在光束作用下，温度迅速上升到沸点，金属熔化的同时伴随着强烈的气化，蒸发形成的蒸气压力、反冲力等能克服熔融金属的表面张力以及液体的静压力等排开熔化金属而形成小孔，激光束可以直接深入材料内部，因此能获得熔深较大的焊缝。

3.4　热导焊

3.4.1　热导焊的特点

热导焊是指激光辐射加热在工件表面，表面热量通过热传导向内部扩散，通过控制激光功率等参数，使工件熔化，形成特定的熔池。由于其独特的优点，热导焊已成功地应用于微、小型零件的精密焊接中。激光热传导焊接时，功率密度比较低，范围一般在 10^4～10^6 W/cm^2，表层温度达到沸点需经历数毫秒，并在表层气化前，底层到达熔点，易形成良好的熔融焊接。由于金属加热温度控制在沸点附近，不致于形成很大的蒸气压力，不形成熔池小孔。工业上常用的热导焊是低功率脉冲 YAG 激光焊。

3.4.2　脉冲激光热传导焊接工艺参数的选择

1）功率密度的选取　在脉冲激光焊接中，要尽量避免焊点金属的过量蒸发与烧穿，因而合理地控制输入到焊点的功率密度是十分重要的。

激光斑点上的功率密度 P 由下式决定。

$$P=\frac{4E}{\pi d^2 t_P} \tag{5.1-28}$$

式中，P 为激光斑点上的功率密度；E 为激光能量；d 为光斑直径；t_P 为脉冲宽度。

为获得足够强度的焊点，对不同类型不同厚度的材料，应有一个合理的功率密度 P。功率密度 P 太小焊点强度降低，甚至形不成焊点；功率密度 P 增大超过 10^5 W/cm^2 时，则金属气化过多，形成小孔，同样不能形成稳定牢固的焊点。为了得到合理的功率密度，激光输出能量 E 和脉冲宽度 t_P 应适当配合。不同厚度的镍、铜点焊时所需要的 E、t_P 关系如图 5.1-14 所示。材料厚度一定时，所需 E、t_P 成直线变化关系。这说明材料厚度一定时，所需功率密度是一个定值，厚度增加所需功率密度增加。

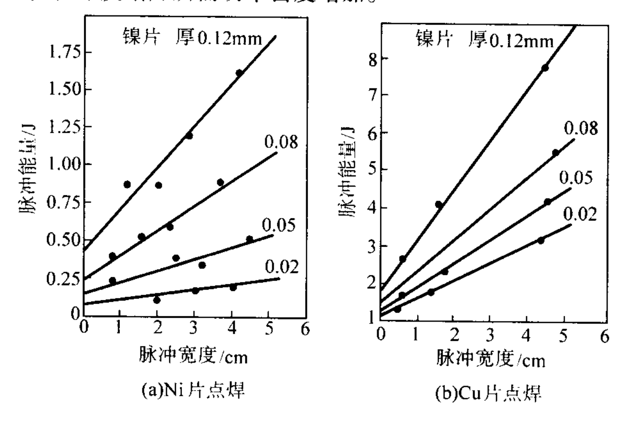


图 5.1-14　Ni、Cu 片焊接时脉冲能量与宽度的关系

焊接过程金属的蒸发还与材料的性质有关，即与材料的蒸气压力有关，蒸气压高的金属易蒸发。另外，熔点与沸点相差大的金属，焊接过程易控制。大多数金属达到沸点的功率密度约在 10^5～10^6 W/cm^2 以上。对功率密度的调节可以通过改变脉冲能量、光斑直径、脉冲宽度以及激光模式等实现。

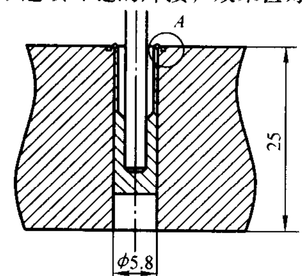
2）离焦量的选择　一定的离焦量可以使光斑能量的分布相对均匀，同时也可以获得合适的功率密度。尽管正负离焦量相等时，相应平面上的功率密度相等，然而，两种情况下所得到的焊点形状却不相同。负离焦时，小孔内的功率密度比工件表面的高，蒸发更加强烈。因此，要增大熔深时，

可以采用负离焦；而焊接薄材料时，则宜采用正离焦。

3）保护气体的选择　Nd：YAG激光器若采用脉冲焊接，因为焊点的形成时间短，不容易产生等离子体，激光氧化物形成倾向也小，所以Nd：YAG激光的点焊一般不用气体保护，但在焊点的表面会形成氧化膜或金属蒸气的沉积物。若采用重复脉冲进行焊接时，第一次形成的氧化膜或沉积物有可能进入第二个焊点，影响焊缝质量，所以，针对Nd：YAG激光的连续焊接也应采用气体保护。

3.4.3　典型微型零件的激光焊接

低功率的热传导焊主要用于ϕ0.5 mm以下金属丝与丝或薄板之间的点焊，特别适合微米级的细丝和薄箔的点焊，最细可以焊接ϕ0.02～0.2 μm的金、银、铝、铜细丝，如应用于集成电路内引线的焊接——将硅片上1.8 μm厚的铝镀膜与50 μm厚100 μm宽的铝箔进行点焊，微型薄膜电路元件导线焊接——将镀在微晶玻璃衬底上0.3～1 μm厚的铜、铬、金镀膜与ϕ30～80 μm金、铜、镍丝进行点焊等。在航天、航空、仪表工业中同样得到广泛的应用，如直径0.05～0.12 μm的铍铜游丝与直径4 mm的黄铜柱的点焊，在Ar气体保护下激光点焊钨铼高温热电偶，在焊接处能形成直径0.27 mm的钨铼金属球。脉冲激光焊接除完成点焊以外，还可以完成连续焊缝的焊接任务。如图5.1-15所示是核反应堆中的一个零件，将壁厚0.4 mm，直径5.8 mm的316不锈钢管件焊在304不锈钢基板上。用红宝石脉冲激光焊机，完成了连续环缝的焊接，效果甚好。



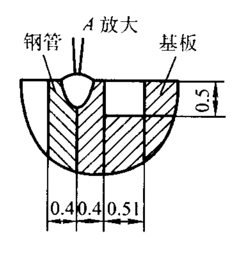


图5.1-15　核反应堆零件激光脉冲环缝焊

1）丝与丝的焊接　细丝之间的焊接难度较大，尤其是直径为0.01～0.1 mm的细丝焊接。采用脉冲激光点焊已经取得良好的效果，显示了独特的优越性。表5.1-9给出了几种丝与丝的焊接接头形式及焊接特点。

表5.1-9　丝与丝的焊接接头形式及焊接特点

接头形式	焊接特点
丝与丝对焊	丝状元件的焊接与片状元件比较，在热传导方面差距较大。片状元件在焊点周围各个方向上都有较好的热传导条件，可焊参数范围较大。但丝的焊接只沿着丝方向传热，激光参数需要严格控制。金属丝越细，参数要求越严格，器件稳定性要求越高 细丝对焊中，其间隙要求甚高，丝越细，间隙要求越小。间隙大，即使无气化，但由于熔融金属填充间隙，使熔融区变细，强度降低。在实际工作中，这样严格的间隙要求难以保证。为此，可以根据不同情况分别采用45°截面对焊（增大接触面积），或先用激光使两丝端部先熔成小球后再对焊 细丝对焊中，应尽量使光斑覆盖细丝接头，且光斑上能量分布均匀。对于直径差距大的两丝对焊，要求光斑直径比细丝大的多，中心偏向粗丝侧，以保证粗、细丝同时熔化
交叉焊	两金属丝交叉成十字形，激光同时照射两金属丝交叉点，使两丝同时熔化。若两丝直径不同，应将细丝置于上层，此时可以用较小的能量获得良好的焊接效果
平行搭接焊	两金属丝平行放置，激光同时照射搭接部位，使两丝同时熔化。这种焊接方式类似于片与片的接缝对焊，对于工件要求也类似于片间对焊。如需增大强度，在工艺允许的条件下，可以将搭接部分增长，多焊几点
T型焊	此焊接方式类似于交叉焊，但更灵活，除可以将两丝置成T型、Γ型，激光同时照射两丝形成熔融连接区外，还可以根据具体情况采取某些措施，使得焊接效果更好。如将细丝绕在粗丝上，焊接缠绕区。若两丝直径相差5倍以上，细丝直径很小，可以将激光在粗丝上打孔，将细丝从小孔中穿出，并将细丝端部球化，最后将细丝球部在小孔处与粗丝熔接为一体。采用这种工艺方法不仅焊接处光滑，且强度好。现在已经成功地将ϕ0.01 mm钨丝与ϕ0.5 mm的镍铬丝形成T型连接，将ϕ0.05 mm铂铑丝与ϕ3 mm×3 mm铝棒形成T型连接

2）金属丝与块状元件的焊接　采用激光焊接可以成功地实现金属丝和块状元件的连接，块状元件的尺寸可以任意。在焊接中应注意丝状元件的几何尺寸，表5.1-10给出了几种接头形式和焊接特点。

表5.1-10　丝与块状零件焊接常用的接头形式和焊接特点

接头形式	焊接特点
(a)	将细丝或细棒插入预先钻好的孔中进行焊接最易实现，如图a所示。此时，光斑直径应稍大于丝的直径。所钻的孔仅需略大于丝的直径，且配合越紧越好。若将丝端高出表面为丝直径的0.3～0.5，适当增加激光辐射能量，则可以形成一半球面的"帽子"，显著增大了连接强度
(b)	当丝与块状元件作T形连接时，需根据金属丝直径，从周围对称焊两点或更多的点。此时激光需同时照射丝与块状元件，则效果良好。端焊可以用单点焊接，也可以用多点。激光束必须同时照在两元件上，才能获得良好的效果
(c)	
(d)	
(e)	

续表 5.1-10

焊接方式	焊接特点
(f)	图 f 将金属丝置于平板元件的小槽或凹口内，当激光光斑大于丝直径时，焊接可靠性好

激光焊接还可以用于混合电路薄膜元件的导线连接。电路元件是在微晶玻璃、陶瓷为衬底的材料上制作，多用金属薄膜为对外连接区。常用的金属材料有铜、铬、镍、金等，薄膜厚度为 0.3～1 μm，引线材料为金、铜、镍等。直径为 30～80 μm，薄膜与导线的尺寸相差甚大，从工艺要求出发，必须从引线侧进行焊接，导线熔化所需的光能大大超过薄膜破坏阈值，因此不允许激光同时照射导线和薄膜，只能通过导线熔化后，将部分能量传递到薄膜上，引起薄膜熔化。在薄膜元件上施行激光焊接，参数范围较窄，对激光器的稳定性要求高。

(3) 薄片与薄片的焊接

表 5.1-11 给出了脉冲激光焊接薄电零件常见的焊接接头形式和焊接特点。

表 5.1-11　脉冲激光焊接薄片零件常见的焊接接头形式和焊接特点

接头形式	焊接特点	图示
对接	两片金属端面对齐，激光直接辐射两金属片的对缝，使两片金属对口端面同时熔化，形成熔池。随着激光辐射的停止，熔池金属迅速凝固，实现焊接（如图 a）。这种焊接形式对焊前的对接精度有较严格要求，两金属片对口端面之间的间隙及两金属被焊面的高度差越小越好。接头的配合精度，根据激光能量、光斑尺寸、脉冲宽度等工艺参数而定。在对接间隙小于厚度的 15% 和两焊接面高度差小于厚度的 25% 的情况下，通常能获得良好的焊接效果；否则，易产生裂纹	(a)
搭接	两金属片重叠放置（如图 b），激光同时辐射上金属片的端部和下金属片的搭接处，使两金属片同时局部熔化，形成焊接区。这种焊接方式对两金属片的配合精度要求不高，便于操作，常用于零件的密封焊接。但焊接时要求上、下金属片紧密贴合，其间隙应小于熔深的 25%。另外，上片不易太厚（应为熔深的 30%）。上片过厚时可在其端部倒角 45°～60°，避免产生裂纹	(b)
穿透熔焊接头	两金属片的放置方式如图 c 所示，激光是直接辐射在金属片上，使热量从上片表面向下传导，金属的熔化从上至下逐渐发生，直到上片深处和下片金属上部发生熔化，形成熔池，获得焊点。这种焊接的特点是焊缝的熔深要大于上金属片的厚度。很明显，以较薄金属片作为上片方可使焊接操作变得容易，用较小的功率密度就能达到焊接目的。若必须以较厚的片作为上片，应加大功率密度，使辐射区的材料发生强烈的气化，借助金属蒸气的压力把熔融金属挤向四周，使激光能量达到较深的位置，但应防止由于过分气化而引起熔化金属的飞溅。在这里需要注意的是，对密封组件的焊接要保证焊缝有足够的熔深	(c)
穿孔焊接头	两金属片也是重叠放置，如图 d 所示。一般是采用前置尖峰的激光脉冲直接辐射在金属片上，由于初始激光峰高值，使光斑中心处气化形成一个小孔，然后激光可以通过该小孔直接辐射下金属片，使其熔化达到焊接。这种焊接方式主要用于点焊，其缺点是金属的蒸发量大，容易产生焊接缺陷	(d)

3.4.4　微型零件激光焊接时的工艺问题

1) 选择适合焊接的激光模式　激光模式是指输出的激光束断面上能量分布情况，模数越低，能量分布越集中，越适合焊接。TEM_{00} 称为基模，能量最集中，是激光点焊最常用的模式。

2) 脉冲激光点焊用于薄膜板的连续密封焊缝时，焊接速度

$$v = df\ (1-k) \tag{5.1-29}$$

式中，v 为焊接速度，cm/s；d 为焊点直径，cm；f 为脉冲频率，次/s；k 为重叠系数，取值范围 0.3～0.9，板厚增加，k 值增大。

3) 细丝与膜片焊接时，若丝过细，可以将细丝被焊端预先熔化，结成直径为细丝直径 2～3 倍的球，这样可以增加接触面，增加强度和可靠性，也为焊接操作提供了便利条件。

4) 为保证激光精密微型焊接质量，除首先必须选用恰当的激光脉冲能量（几焦到十几焦）和宽度（3 ms 左右）外，还应注意：①把反射率低、传热好、厚度小的金属件放在上面；②焊前可以先在丝或膜端熔结成球状，以增大接触面和便于对准；③薄箔可用连续点焊增加缝宽。

3.5　激光深熔焊接

3.5.1　激光深熔焊接原理

当激光功率密度达到 10^6～10^7 W/cm² 时，材料表面发生气化而形成匙孔，孔内金属蒸气压力与四周液体的静力和表面张力形成动态平衡，激光可以通过孔直接射到孔底，称为匙孔效应。匙孔的作用和黑体一样，能将射入的激光能量完全吸收，激光停止后四周的熔化金属迅速将小孔填满而成焊缝。激光深熔焊接时存在以下几种效应。

1) 小孔效应　激光焊接时，激光束被聚焦到工件的表面或表面以下的位置，在与焊件作用开始时，有大部分能量被金属表面反射掉，焊件只能吸收很少一部分。随着表面温度的升高，材料吸收激光的能力增强，使金属发生熔化，形成熔池。激光的继续辐射将会使金属液体发生气化，在熔池中心形成一个小孔，金属的持续气化维持小孔稳定，金属蒸气产生的压力可以使金属液体沿小孔壁向上流动（图 5.1-16）。

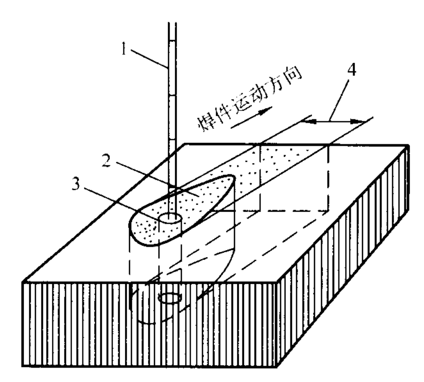


图 5.1-16 激光深熔焊几何特征示意图

1—激光束；2—熔池；3—小孔；4—焊缝宽度

熔化金属在小孔壁的流动情况如图 5.1-17 所示，在金属蒸气压力的作用下熔化金属从小孔前部向小孔后部流动。在小孔底部的气化压力 p_z 可以表示为

$$p_z = 2\sigma / R_z + \rho g z + p\ (f) \qquad (5.1\text{-}30)$$

式中，σ 为孔底部液－气界面的表面张力，N/m；R_z 为孔底部的曲率半径，m；ρ 为液体材料密度，kg/m^3；g 为重力加速度，m/s^2；z 为孔深，m；$p\ (f)$ 为液体流动单位面积阻力，N/m^2。

上式说明小孔中熔化金属的流动条件是，小孔底部的蒸气压力 p_z 应大于表面张力、液体静压力以及熔化金属流动单位面积阻力之和。

小孔的形成，使激光可以直接辐射至小孔深处，加强了熔池对激光能量的吸收，使原有小孔的深度进一步增加，直接进入小孔内部的激光将在小孔内发生反复折射（图 5.1-17）。

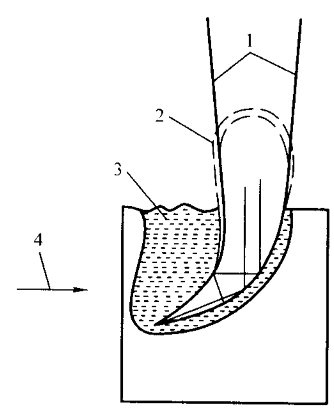


图 5.1-17 小孔内激光的吸收过程

1—激光束；2—等离子体；3—熔化区；4—焊件运动方向

进入小孔的激光功率密度可以表示为

$$I = I_0\ (1 - A)^n \exp\left[-\alpha\ (x_1,\ x_2 + \cdots)\right] \qquad (5.1\text{-}31)$$

式中，I_0 为进入小孔前的功率密度，W/cm^2；A 为孔壁对激光的吸收率；n 为激光在小孔内的折射次数；α 为吸收系数；x_1、x_2 为两次反射间的激光行程。

激光在小孔内反复折射有利于熔池对激光能量的吸收。若连续辐射的激光相对工件进行移动，则小孔也随之移动，激光束始终与熔池前沿相互作用，熔化金属的气化使小孔得以维持，并造成熔池金属流动，形成一个深宽比很大的连续焊缝。如果使用的是脉冲激光，情况就不一样了，小孔中的熔化金属在激光停止辐射以后会汇聚到中心，发生凝固。激光与工件相对运动时，熔化金属靠表面张力的支持在小孔的前沿形成一个很小的波纹，随着激光束向前移动，波纹向前发展，焊缝表面光洁且美观。若激光的功率密度小于 10^3 W/mm^2 时，形成的孔不但浅且很宽。孔的形成机制以热传导为主。当激光功率密度过大，超过 10^7 W/mm^2 时，激光对金属的辐射可能会引起熔化金属的过量喷溅和蒸发，使熔池金属大量损失，造成焊缝下陷以及产生气孔等缺陷，不利于获得高质量焊缝，应引起注意。

2）等离子体屏蔽效应　激光深熔焊的功率密度可以达到 10^6 W/mm^2 左右，如此高的功率密度足以使熔池金属发生气化，产生蒸气，如图 5.1-18。

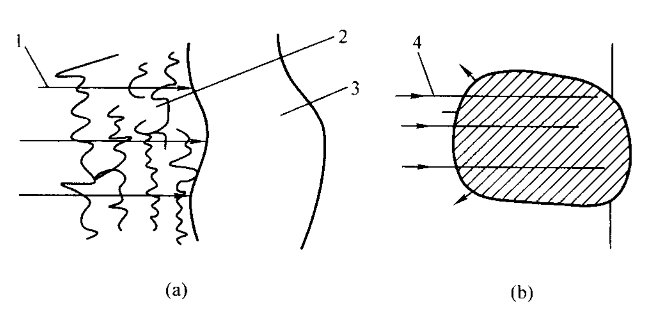


图 5.1-18 强激光辐射金属表面发生的物理过程示意图

1—蒸发；2—金属气体；3—液态金属；4—等离子体云

由图 5.1-18a 可见，金属蒸气位于激光辐射区上方，激光对金属蒸气的进一步辐射会使其中的电子动能增加，运动速度加快，电离更多的粒子，从而造成电子密度增加，形成等离子体云。如图 5.1-18b 所示，等离子体云靠近焊件表面的激光作用区，位于激光源与焊件之间。等离子体云吸收激光能量，对入射激光有散射作用，它可以使入射激光光斑尺寸变大，功率密度下降。因此，焊件前部的等离子体云对激光能量有屏蔽效应。在入射激光能量不变的前提下，焊件上方的等离子体密度的大小取决于蒸气量的多少。蒸气量少，则产生的等离子密度小；反之，产生的等离子体密度大。等离子体密度的变化使进入熔池的激光能量发生变化，导致焊缝熔化深度不均匀，影响接头强度。等离子体云对激光的吸收系数 α 可以表示为

$$\alpha \approx \gamma_c {\omega_p}^2 / c\ (\omega^2 + {\gamma_c}^2) \qquad (5.1\text{-}32)$$

式中，γ_c 为电子与原子或离子间的碰撞频率，Hz；ω_p 为等离子体振荡频率，Hz；c 为光速，km/s；ω 为激光频率，Hz。

对于 $\omega > \omega_p$，$\omega > \gamma_c$，式（5.1-32）可以表示为

$$\alpha \approx K_0 n_e n_m \lambda^2 \qquad (5.1\text{-}33)$$

式中，K_0 为常数；n_e 为电子密度；n_m 为蒸气密度；λ 为激光波长，μm。

式中等离子体对于激光的吸收系数与电子密度、蒸气密度成正比，而这两个参数又受激光功率密度的影响，随激光功率密度的增加而增加。等离子体对短波长激光的吸收小。在同等条件下等离子体对 CO_2 激光的吸收系数比 Nd：YAG 激光高出两个数量级。由此看来，等离子体对 CO_2 激光的屏蔽作用远大于对 Nd：YAG 激光的屏蔽作用，这是使用 Nd：YAG 激光进行激光焊接的一个优点。经等离子体吸收后到达工件表面的激光功率密度 I_0 可以表示为

$$I_0 = I\exp\ (-\alpha h) \qquad (5.1\text{-}34)$$

式中，I 为入射激光功率密度，W/cm^2；h 为等离子体云厚度，m。

等离子体云吸收的激光能量，可以通过传导、辐射和冷凝等方式传输给焊件，但数量较少，加之工件获得的热量不是集中在熔池上，所以等离子体向工件的传热没有多大用途。在激光焊接过程中，等离子体对形成焊缝的不利影响起主导作用，应该给予抑制。常用的控制方法见表 5.1-12。



表 5.1-12　等离子体的控制方法

控制方法	特点
侧向下吹气法	在熔池小孔上方，沿侧下方吹送保护气。其作用是，一方面吹散电离气体，另一方面还有对熔化金属的保护作用。大功率焊接时，一般吹送 He 气，因为 He 元素位于元素周期表的最右上角，电离势高，不易电离
同轴吹送保护气体法	与侧向下吹气相比，该方法可以将部分等离子体压入熔池小孔内，增强对焊缝的加热
双层内外圆管吹送异种气体法	喷嘴由两个同轴圆管组成，外管通 He 气，内管通 Ar 气。外管 He 气有益于减弱等离子体以及保护熔池，内管的 Ar 气可以将等离子体抑制于蒸发沟槽之内。此方法适用于中等功率的 CO_2 激光焊接
光束纵向摆动法	此方法利用光束的移动来避开等离子体。当光束在起始位置时，等离子体云很小，激光深入内部，小孔向深处发展；然后，光束与工件以相同的速度移动，激光停留于工件上的一点，熔化继续向深处发展；随着熔深的增加，等离子体云逐渐增多，在产生大量的等离子体云之前，光束迅速移开，重新开始深熔过程
低气压法	该方法的原理是，光束周围压力低时，气体的密度小，等离子体云中的电子密度小，因而减小了等离子体的不良影响。此方法需要真空室
侧吸法	吸管置于激光束工件的作用点附近，与工件表面成一定角度，吸管接抽气机，从而在工件表面形成局部低压，减小了等离子体的体积和电荷数量
外加电场法	在熔池上方的等离子体区域两侧，加一直流电场，使等离子体内正、负电荷向两侧运动，减小对激光的散射荷吸收
外加磁场法	其原理是基于电荷受磁场作用时，在洛仑兹力的作用下产生旋转，适当的磁场可降低激光束通道上的电子密度，进而减小对激光的散射和吸收

3）对焊缝金属的净化效应　金属中往往含有 S、P、O、N 等非金属杂质，它们或者独立存在于金属基体中，或者固溶在金属基体中。受到激光照射时，由于非金属的吸收率远远大于金属，故独立存在于金属基体中的杂质随温度的迅速上升而逸出熔池。而固溶在金属基体中的杂质也由于其沸点低，蒸气压高而很容易地从熔池中逸出。结果是减少了焊缝中的有害元素和杂质，提高了焊缝的塑性和韧性。

4）壁聚焦效应　壁聚焦效应是指深熔焊接时，由于熔池小孔出现，激光束深入小孔内部，小孔壁对激光多次吸收、反射，最终在小孔底部形成较高的激光功率密度，并被全部吸收的作用。

3.5.2　激光焊接工艺参数选择及影响因素

激光深熔焊接时，能量转换是通过熔池小孔完成的。小孔周围是熔融的液体金属，由于壁聚焦效应，这个充满蒸气的小孔犹如"黑体"，几乎全部吸收入射的激光能量，总之，热量是通过激光与物质的直接作用而形成的。而常规的焊接和激光热传导焊接，其热量首先在工件表面聚积，然后经热传导到达工件内部。这是激光深熔焊接和热传导焊接的根本区别。激光深熔焊接工艺参数及其对熔深的影响包括入射光功率、激光束、吸收率以及保护气体等多种因素。

1）入射光功率的影响　它主要影响熔深，当光斑直径保持不变时，熔深随入射光束功率的增加而变大。在其他条件相同时，高功率激光焊接获得的熔深大，如图 5.1-19 所示。在维持小孔效应的最低临界焊速下，可得到最大熔深。这个最大熔深是激光功率的函数，还受到光束质量、聚焦光路、焦斑直径、保护气体等一系列因素的影响。

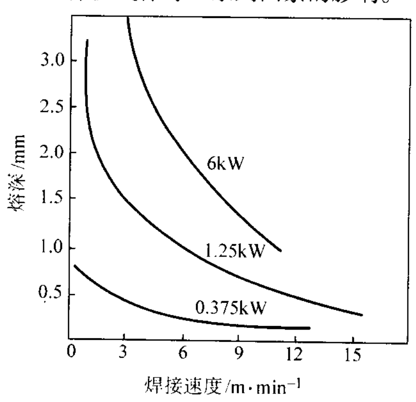


图 5.1-19　低碳钢在不同功率条件下熔深随焊接速度的变化

由于光束从激光器到工件上的功率总是小于激光器的输出功率，所以，入射光束功率应是照射到工件上的实际功率。在焊接速度一定的前提下，焊接不锈钢、钛、铬时，最大熔深 h_{max} 与入射光束功率 P 之间存在以下关系：

$$h_{max} \propto P^{0.7} \tag{5.1-35}$$

作为一种粗略的估算，可以认为熔深和激光功率成正比。更粗略地说，熔深的毫米数等于激光功率的千瓦数。这个估算值比最大熔深小，但最大熔深并不是最佳熔深。为了得到高的焊缝质量，熔深应小于其最大值。以上估计值并不一定是最大熔深，实际激光焊接所需要的是最佳熔深而未必是最大熔深。

对 Nd：YAG 激光的连续缝焊，影响熔深和焊缝形状的还有激光脉冲能量、脉冲宽度和频率。用 2.5 kW 的 CO_2 激光和 3 kW 的 Nd：YAG 激光对车用镀锌钢板（厚度 1～1.5 mm）的拼焊，得出的最大激光焊接速度与激光功率关系如图 5.1-20。由试验可以知道，高的激光功率允许以较大的速度进行焊接。还可以看出，在同等激光功率的情况下，Nd：YAG 激光所允许的最大焊接速度较 CO_2 激光高，这是材料表面对 Nd：YAG 激光的吸收率较 CO_2 激光大的缘故。

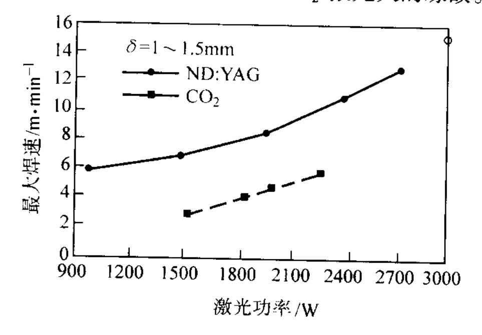


图 5.1-20　最大焊接速度与激光功率之间的关系

2）吸收率　吸收率决定了工件对激光束能量的利用率。研究表明，金属对红外光的吸收率 ρ_A 与它的电阻率 ρ_r 之间的关系为

$$\rho_A = 112.2\sqrt{\rho_r} \tag{5.1-36}$$

电阻率又与温度有关，所以，金属的吸收率又与温度密

切相关。理论计算表明，材料 Ti－6Al－4V 在 300℃时的吸收率约为 15%，而 304 型不锈钢、Fe 和 Zn 即使在熔融状态，其吸收率也低于 15%，这说明反射所造成的能量损失是很大的。

尽管大多数金属在室温时对 10.6 μm 波长光束的反射率一般都超过 90%，然而，一旦熔化、气化、形成小孔以后，对光束的吸收率将急剧增加。图 5.1-21 显示了金属材料吸收率随表面温度和功率密度的变化。

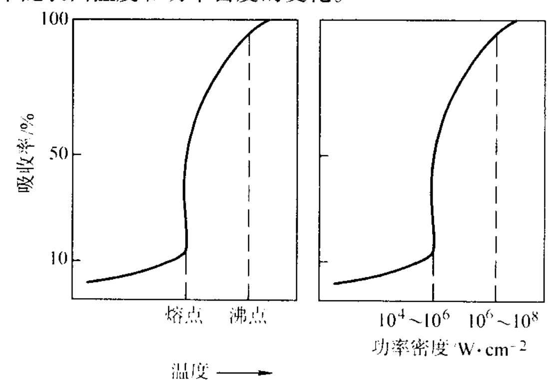


图 5.1-21　金属材料吸收率随表面温度和功率密度的变化

由图 5.1-21 可以知道，达到沸点时的吸收率已经超过 90%，不同金属达到其沸点所需要的功率密度也不同，钨为 10^8 W/cm²，铝为 10^7 W/cm²，碳钢和不锈钢则在 10^6 W/cm² 以上。对材料表面进行涂层或生成氧化膜，可以有效地提高对光束的吸收率。图 5.1-22 表示在不同的表面处理条件下，熔透功率与焊接速度的关系。可以看出，材料表面经处理后对光束的吸收率有不同程度的提高。

另外，使用活性气体也能增加材料对激光的吸收率。实验表明，在保护气体氩中添加 10% 的氧，可以使熔深增加一倍。

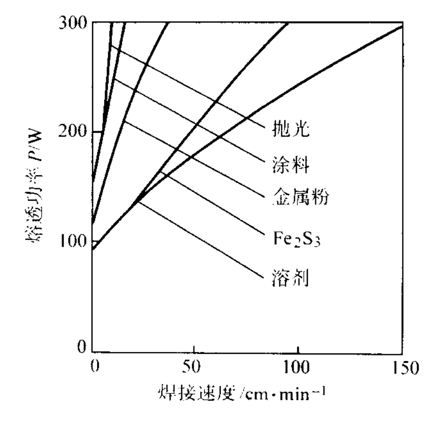


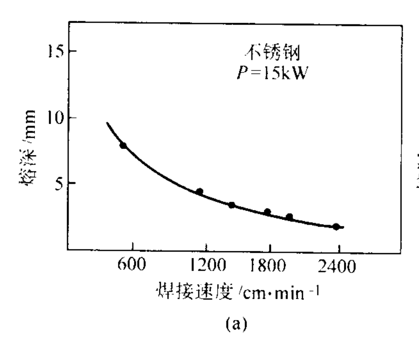
图 5.1-22　不同表面处理条件下熔透功率与焊接速度的关系

3）焊接速度　激光焊接时，可以用线能量来描述焊件接受激光辐射能量的情况。线能量的定义为：单位长度焊缝接受的激光能量。焊接速度大时，焊缝的线能量小，熔深下降；反之，可以获得较大的熔深。激光焊接时，要根据材料的热物理性质、接头形式和零件厚度等条件选择焊接速度，应能使材料吸收到足够的激光能量，实现充分的熔化，获得理想的熔深。

焊接速度主要影响焊缝熔深和熔宽。深熔焊接时，熔深几乎与焊接速度成反比。

在给定材料、给定功率条件下对一定厚度范围的工件进行焊接时，有一合适的焊接速度范围与之对应。功率一定时，提高焊接速度，线能量（单位长度焊缝输入能量）下降，熔深减小。但是焊接速度过高时，会导致焊不透或焊缝浅，接头性能差，如果焊件是镀锌钢板，则易导致镀锌层大面积蒸发或剥落，影响焊件质量；焊接速度过低，又会使材料过量熔化，焊缝宽度急剧增加，甚至导致烧损和焊穿。

由图 5.1-23 可见，高速段比低速段的熔深减小率要小。这说明高速焊接更能发挥激光焊接的优势。



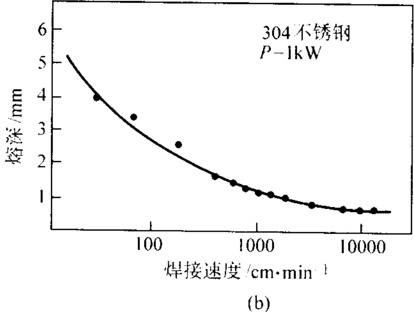


图 5.1-23　焊接速度对熔深的影响

另外从图中可见熔深随焊速的下降而增加，但有极限。速度过低，熔深不会再增加，而焊缝变宽。说明由于线能量增加，熔化区加大，同时小孔区的温度上升，等离子体的浓度增加，对激光的吸收系数增加。速度低至一定值，穿透等离子体、到达小孔底部的激光功率密度过小，不足以气化材料，蒸气压不足以维持小孔，使小孔崩溃。焊接过程蜕变为传导型。因此，对于给定的激光功率等条件，存在一维持深熔焊接的最低焊接速度，在此最低焊速下的熔深为给定焊接条件下的最大熔深。

4）离焦量　离焦量即工件表面与焦点的距离。若焦点落在工件外部，称正离焦量；若焦点落在工件内部，称负离焦量。为了使用方便，离焦量 $+\Delta F$ 用与焦距的相对值 $\Delta F/F$ 来表示，它不仅影响工件表面光斑直径的大小，而且影响光束的入射方向，因而对焊缝形状、熔深和横截面积有较大影响。图 5.1-24 是采用功率为 5 kW、焊接速度为 16 mm/s、对板厚为 6 mm 的 310 型不锈钢进行实验所得到的结果。当焦点位于工件较深部位时，形成 V 形焊缝；当焦点在工件以上较高距离（正离焦量大）时，形成“钉头”状焊缝，且熔深减小；而当焦点位于工件表面以下 1 mm 左右时，焊缝截面两侧接近平行。实际应用时，焦点位于工件表面下 1～2 mm 的范围较为适宜。

图 5.1-25 为采用 1 000 W 激光、焊接速度为 50 cm/min、焦距为 50～100 mm、对 304 型不锈钢进行实验所得出的离焦量对熔深、熔宽和截面积影响的关系曲线。图中，F 为焦距，ΔF 为离焦量。由图可以知道，熔深随离焦量有一跳跃性变化，在 $|\Delta F|$ 很大的地方，熔深很小，未形成小孔，这时属于热传导焊接；当 $|\Delta F|$ 减小到某一值后，熔深发生跳跃性增加，这标志着小孔效应开始产生，因此形成了小孔焊。

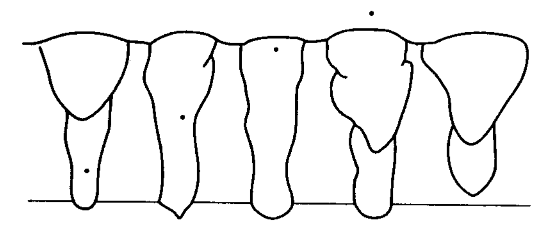


图 5.1-24　离焦量对焊缝形状的影响

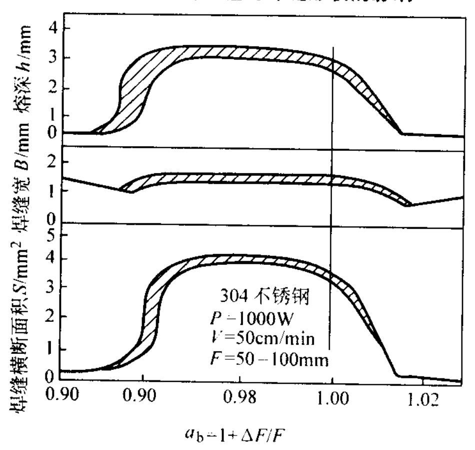


图 5.1-25　离焦量对熔深、熔宽和横截面积的影响

5）保护气体成分和流量　激光深熔焊接时，保护气体的作用有两个：①保护被焊部位免受氧化，防止焊缝处产生气孔；②抑制等离子云的负面效应。

在激光焊接过程中保护气体对焊缝的吹散，不但能防止焊缝的氧化和生成气孔，而且还能把等离子体云吹散，增加熔池对激光能量的吸收。保护气电离势低，形成的等离子云多，焊缝熔深减小严重；保护气体电离势高，形成的等离子云少，焊缝熔深减小较少。所以选择的保护气体应该有较大的电离能，并防止保护气体本身发生电离，产生电离子体。常用的保护气体有氩气、氦气和氮气。

一般地说，等离子体的形成会降低焊接过程的效率。其影响程度与激光功率密度和焊接速度有关。功率密度越大，焊速越低，金属蒸气和电子密度越大，对焊接过程的影响越大。在焊接过程中吹保护气体，可抑制等离子体，其作用机理如下：

① 通过增加电子、离子和中性原子三体碰撞来增加电子的复合速率，以降低等离子体中的电子密度。中性原子越轻，碰撞频率越高，复合速率越高。另一方面，保护气体本身的电离能应该高，不致因气体本身的电离而增加电子密度。常用气体和金属的电离能和原子（分子）量如表 5.1-13。氦气最轻而且电离能最高，因而对着激光作用区吹氦有最好的抑制等离子体效果。但对于我国这样一些使用氦气很贵的国家，大量吹氦是不经济的。采用氩气或氮气作保护气体，也有较好的抑制等离子体效果。

表 5.1-13　常用气体和金属的相对原子质量（相对分子质量）和电离能

材料	氦	氩	氖	氮	二氧化碳	水汽	氧	铝	铬	镍	铁	镁	锰
相对原子质量（相对分子质量）	4	40	20	28	44	18	32	27	52	59	56	24	55
电离能/eV	24.46	15.68	15.54	14.5	14.41	12.56	12.50	5.96	6.74	7.61	7.83	7.61	7.41

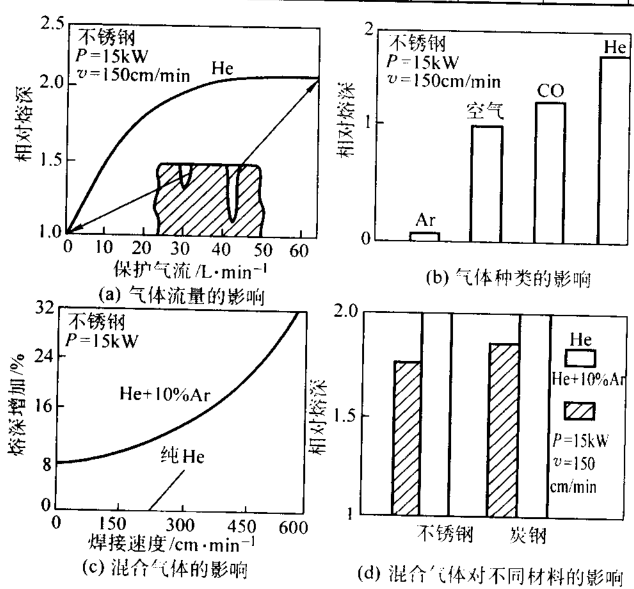


图 5.1-26　保护气体对熔深的影响

② 利用保护气体流动的动量，将金属蒸气和光致等离子体从激光光路中吹除。

采用保护气体横吹，较大流量保护气体平行于工件表面吹过激光作用区，光致等离子体受到一定程度的抑制，得到深而窄的连续均匀焊缝。横吹是常用的吹气方法。用一较小直径喷管将保护气体以一定角度直接射入深熔焊接的小孔，保护气体不仅抑制了工件表面的等离子体云，而且对孔内的等离子体及小孔的形成施加影响，可以进一步增大熔深。但这种吹气方法的气流量要小，以免破坏溶池，对气流的调整精度和稳定性要求较高，焊接效果难以稳定。保护气体对熔深的影响如图 5.1-26 所示。

图 5.1-26a 显示了气体流量对熔深的影响。保护气流有吹散等离子云的作用。故在一定的流量范围内，保护气流增大，等离子云的影响减弱，焊缝熔深增加；超过一定值以后，熔深则基本维持不变。这是因为流量从小变大时，保护气体去除熔池上方等离子体的作用加强，减小了等离子体对光束的吸收和散射作用，因此熔深增加，一旦流量达到一定值以后，仅靠吹气进一步抑制等离子体负面效应的作用已经不明显，因此，即使流量再加大，对熔深的影响也不大了。另外，还会使焊缝表面凹陷。

图 5.1-26b 显示了不同种类保护气体对焊缝熔深的影响。

由图可知，He 可以显著改善激光的穿透力，适合于作 CO_2 激光焊的保护气体，这是因为它的电离能较高，本身不容易形成等离子体，有利于获得大熔深焊缝。另外，它的密度比空气小，在焊缝中不易形成气孔。若在 He 中添加 1% 的有更高电离能的 H_2（体积分数），则又会进一步改善光束的穿透力，使熔深进一步增加。He 对焊缝的保护效果显著，是焊不锈钢和钛合金的常用保护气体。但 He 的价格较贵，会增加生产成本。

Ar 的电离能低，易在高能量密度激光的作用下产生等离子体，但是 Ar 有良好的防氧化作用。另外，Ar 较难从液体金属逸出，易形成气孔。若进行的是穿透熔焊，则 Ar 有机会从焊缝底部排出。有时在焊道上部安装抽吸装置，使

Ar从焊缝上部排出，避开激光的辐射，在不引发等离子体产生的情况下Ar还是可以使用的。Ar的成本比He低，批量生产时可显著降低生产成本。

空气和CO_2对光束穿透力的影响介于Ar和He之间。

另外，氮气的保护效果也比较好，其缺点是容易造成焊缝脆性，常用于一般结构件的焊接，如焊家用电器设备的外壳等。

从获得最大熔深考虑，氦气效果最好，氮气次之，氩气最差。但这种差别只是在激光功率密度较高、焊接速度较低、等离子体密度较大时，才较明显。在较低功率、较高焊接速度下，光致等离子体很弱，不同保护气体的效果差别很小或没有差别。

高速焊接时，选择保护气体不能仅仅考虑气体的电离能，还应考虑气体的密度。因为电离能较高的气体往往原子序数较低，质量也较小。高速焊接时，这些较轻的气体不能在短时间内把焊接区域的空气排走，而较重的气体则可以实现这一点，因而，把较重的气体和较轻的而电离能又高的气体混合在一起，将会产生最佳的熔透效果。图5.1-26c表明尽管提高了焊接速度，当在He中添加10%的Ar时，仍可以显著增加熔深。

3.5.3　典型材料的激光深熔焊接

所有可以用常规方法进行焊接的材料或具有冶金相容性的材料都可以采用激光焊接，一些用常规方法难焊的材料，如高碳钢、高合金工具钢以及钛合金等，也可以采用激光焊接。影响材料激光焊接性的因素除了材料本身的冶金特性以外，还包括材料的光学性能，亦即材料对激光的吸收能力。吸收能力强的材料易于焊接，而吸收能力差（反射率大）的材料（如Al、Cu等）焊接较困难。各种材料对激光焊接的可焊性与对传统焊接方法的可焊性类似。主要合金材料用激光焊接的焊接特性如表5.1-14所示。

表5.1-14　主要合金材料用激光焊接特性

合金	激光焊接特性
钢	好，最常用
不锈钢	多数可用，良好
铝及铝合金	良好，但反射率高，有气孔，流动性差
铜及铜合金	一般，需激光功率大，且进行表面预处理
钛及钛合金	比低速焊接过程好，晶粒长大少
铱合金	存在热裂纹问题
镍基高温合金	良好，但焊缝脆，有偏析和裂纹

1）碳钢的激光焊　采用合适的规范参数对低碳钢进行焊接时，焊缝具有良好的拉伸和冲击等力学性能，用X射线进行检验的结果也很好。钢中氧的质量分数>0.01%时，容易在熔焊时产生气体，导致形成气孔和裂纹，所以镇静钢的激光焊接头质量会更好一些。碳是钢中的合金元素，它能增加钢的强度，但随着碳含量的增加，焊缝质量和构件的性能逐渐变差。C的质量分数<0.1%的低碳钢容易焊接，焊缝质量好，这是因为在焊缝区形成的低碳马氏体具有良好的韧性所致。这种焊接构件一般能满足冷冲压成形要求。当钢的含碳C的质量分数>0.1%时，也可以进行激光焊，如齿轮等零件，但焊缝中形成的马氏体脆性较大，容易产生冷裂纹。焊缝性能也与Mn、Cr、Mo、V和Cu等元素有关。钢中的P、S是炼钢的残留元素，它们容易使焊缝产生裂纹。进行激光穿透焊时，钢中P、S的总质量分数≤0.04%。

国内外均已经采用激光焊接汽车齿轮，而这种齿轮原来只能用电子束焊接。国外对三种民用船舶船体结构钢（编号分别为A、B、C）的激光焊接进行了实验研究。实验板材的厚度范围为：A级—9.5～12.7 mm，B级—12.7～19.0 mm，C级—25.4～28.6 mm。钢的C质量分数≤0.23%，Mn质量分数为0.6%～1.03%，钢的脱氧能力从A级到C级依次递增。焊接时，使用的激光功率在10 KW左右，焊接速度为0.6～1.2 m/min。除对厚度为19.0 mm和25.4 mm的板材进行正反两边焊接外，其他试件均为一次焊双面成形。通过对试件进行拉伸、弯曲以及冲击等实验表明，激光焊接头性能良好。美国海军对潜艇耐压壳用Hy-130合金钢的激光焊接表明，接头的力学性能，如断裂强度、伸长率等，比其他常规方法所焊接头的性能优越。冲击实验表明，激光焊接头的DT能（动态撕裂能）接近母材，而且冲击韧度优于母材。

2）不锈钢的激光焊　奥氏体不锈钢有300多种，大多数都可以用于激光焊。但应注意，含S过多的不锈钢容易产生焊缝裂纹。因此，在冶炼用于激光焊的不锈钢时，应该限制S含量。奥氏体不锈钢的热导率是碳钢的1/3，它对激光能量的吸收率效果比碳钢好，在同等能量密度激光的辐射作用下，能获得较大熔深的焊缝。对奥氏体不锈钢进行激光焊时，采用较高的焊接速度和较低线能量也能获得良好的焊缝。如果奥氏体不锈钢在450～870℃长时间保温，会在晶界上析出富Cr碳化物，降低耐蚀性，激光焊时输入的热量过多也会出现这种倾向。奥氏体不锈钢的激光焊缝变形较小，但湿气进入焊缝会引起晶间腐蚀和开裂，所以应采取措施对此进行预防。

铁素体不锈钢的激光焊接性比奥氏体不锈钢差（低碳和低Cr铁素体不锈钢的焊接性要好一些），其熔化焊焊缝的韧性和耐蚀性低于母材，热影响区容易发生晶粒粗化和马氏体相变。

马氏体不锈钢的激光焊接性最差，这是因为其焊缝和热影响区易发生马氏体相变。对于含碳量$\omega_C > 0.1\%$的马氏体不锈钢的激光焊，建议采用奥氏体不锈钢焊丝来减少焊缝的马氏体量，采用合理的焊件预热和焊后热处理来减轻焊缝和热影响区的脆性，避免焊件开裂。

对18-8型（304型）不锈钢，从薄板到厚板（0.1～12 mm）均可以获得成形美观、性能良好的焊接接头。

对镍-铬系300型不锈钢进行深熔焊接表明，焊缝深宽比可以达到12：1，经X射线检验表明，焊缝致密，无缺陷。当焊接工艺参数合适时，接头可以与母材等强度。

对薄壁18-8钛型（321型）不锈钢管的焊接实验也获得了满意的结果，焊缝抗拉强度达到6 560 MPa，并断裂在母材区，焊缝区硬度值也较高，扫描电镜实验显示焊缝为极细的指状组织。

3）铝及铝合金的激光焊　铝和铝合金的热导率大，表面对激光的反射能力强，反射率极高（超过90%）且不稳定，所以较难焊接。另一方面，由于熔池的流动性较差（液相线与固相线温度区间较窄），随着温度的升高，氢在铝中的溶解度急剧增加，这样易在焊缝中形成气孔。合金表面的氧化膜或涂层易进入熔池污染焊缝。焊缝一旦形成，对激光的吸收能力会立刻突然增加，激光能量在熔池底部的高度集中，易导致焊缝熔化金属喷溅和产生气泡，由此也造成焊缝的熔深不易控制。焊缝周围的水蒸气，有时会分解后进入焊缝形成气孔。因此，对这类材料进行焊接时，工件表面需进行预处理，且需要大功率的激光器。铝合金的深熔焊接一般要求较高的功率密度。

国外有人使用8 kW的CO_2激光焊透12.7 mm的5456型铝合金，但焊缝强度比母材低得多，这主要是因为母材中的Mg、Mn元素对激光吸收能力强，形成了择优蒸发，最后导

致焊缝中的 Al_3Mg_2 强化相减少。

尽管激光焊接铝及其铝合金存在较大的困难，但通过大量研究表明，采用 10 kW 左右的激光束和气体保护系统，对抗海洋腐蚀性能良好的铝镁合金（5000 系列）已经进行了成功的焊接。采用 6 kW 的激光器焊接 9.5 mm 的板材时，焊缝虽仍有气孔，但焊道成形良好，平均接头强度达 343 MPa，与母材强度相当，但焊缝塑性较低。

4）铜及铜合金的激光焊　由于铜及铜合金的热导率和反射率比铝合金还要高，对激光有强烈的反射作用，所以较难实施连续深熔焊，但在极高的激光功率和对表面进行处理的前提下，可以对少数合金，如磷青铜、硅青铜等进行焊接，还可以使用 Nd：YAG 激光以脉冲方式对较薄铜板进行点焊。由于 Zn 元素易挥发，黄铜的焊接性能不好。事实上，电子束较激光更适合铜或铝的焊接。

5）钛及钛合金的激光焊　钛及钛合金采用激光焊接可以得到满意的结果。对 1 mm 厚的 Ti－6Al－4V 板材采用 4.7 kW 激光输出功率，焊接速度可以超过 15 m/min。经 X 射线检查显示，接头致密，无裂缝、气孔、夹杂物，接头强度与母材相近，疲劳强度亦与母材相当。当放慢焊接速度时，使用 3.8 kW 激光功率可以焊接 7.5 mm 的厚板。表 5.1-15 是对工业纯钛和钛合金（Ti－6Al－4V）进行深熔焊接所得到的强度实验结果。

表 5.1-15　钛及钛合金激光焊接的强度试验结果

材料	焊缝金属			母材		
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
Ti－6Al－4V	842～904	784～842	11.0～14.0	877～980	817～877	10.0～15.0
工业纯钛	519～561	450～492	27.0	＞484	407	27.0～28.0

6）耐热合金的激光焊　许多镍基和铁基耐热合金都可以进行脉冲和连续激光焊接，且都可以获得好的激光焊缝。通过对铁基合金 M－152 和航空发动机中使用的三种镍基耐热合金（PK33、C263、N75）的激光焊接表明，接头力学性能与母材几乎相当。

Dop－14 合金和 Dop－26 合金是两种宇航用铱基耐热合金，它们具有很高的熔点，具有优良的高温强度和抗氧化性。用激光对其进行焊接时，焊缝晶粒很细，可以消除金属钍在晶界偏析所产生的热裂现象，获得无裂纹的焊缝，而用常规的钨极氩弧焊则是难以办到的。

用大功率（8～14 kW）CO_2 激光器对厚度为 6.4 mm 的 Inconel－718 镍基高温合金组件进行焊接，其接头的力学性能实验数据见表 5.1-16。

表 5.1-16　Inconel－718 合金激光焊接头的力学性能

试验部位	伸长率/%	抗拉强度/MPa	
		断裂强度	屈服强度
母材－横向	16.4	1 372	1 195
母材－横向	16.4	1 372	1 215
母材－纵向	17.0	1 391	1 215
母材－纵向	20.0	1 391	1 225
母材－纵向	5.2	1 372	1 195
母材－纵向	10.5	1 372	1 185

续表 5.1-16

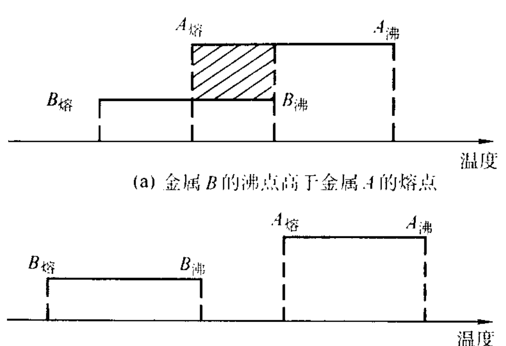
试验部位	伸长率	抗拉强度/MPa	
		断裂强度	屈服强度
母材－纵向	6.0	1 362	1 166
母材－横向	3.9	1 362	1 225
母材－横向	2.2	1 342	1 235
母材－横向	3.2	1 342	1 235

7）镀锌钢板的激光焊　厚度小于 2 mm 的低碳钢板用量很大，为了增加耐蚀性和美感，常在其表面涂覆某种金属，最常见的涂层钢板是镀锌板。钢板表面的涂层材料能在激光焊时进入焊缝，影响焊缝质量。焊缝质量与镀锌板锌层的厚度和接头形式有关。当镀锌板是以对接形式焊接时，由于在钢板端面没有锌，所以，焊缝的成分与母材基本一致。奥迪轿车上使用的厚度小于 0.8 mm 的大块钢板（锌层 20 μm）对接，采用激光缝焊以后效果很好，焊缝的宽度是 1.2 mm 左右，焊接钢板仍具有较理想的冷冲压成形性能，说明焊缝区的锌已蒸发掉，没有损害焊缝质量。若镀锌板以搭接方式连接，且贴合面是非镀锌面时，情况与对接激光焊缝大致一样，锌不会对焊缝构成大的危害；但当贴合面上有镀锌层时，锌会进入焊缝，锌的沸点远低于钢的熔点，激光焊时紧密结合的搭接接头的温度将首先达到锌的沸点温度，使贴合面上的锌产生大量的锌蒸气，其中的一部分会残留在焊缝内部，形成气孔，对焊缝构成危害。镀锌层很薄时，形成的锌蒸气较少，气孔形成倾向小。减少激光焊接速度会增加线能量，扩大了锌蒸发面积，很难达到促进锌蒸气逸出的效果。Nd：YAG 激光脉冲以高峰值功率和短脉宽焊接时，作用区面积小且焊缝宽度窄，可减轻镀锌层对焊缝质量的危害。另一种减轻锌蒸气危害的方法，是在贴合面之间保留一个 0.1 mm 的间隙，用它来储藏锌蒸气，以减少锌在焊缝中的含量。这种方法的效果是肯定的，但在激光焊接生产中所用的大块镀锌板都多少存在着一定的不平度，使贴合面的间隙不易控制。用 CO_2 连续激光焊接有镀锌层的搭接接头时，从焊缝逸出的锌蒸气在焊件上部与激光作用，形成等离子体云，使激光光斑尺寸变大，功率密度减少，因此将导致：①贴合表上锌层熔化面积变大；②焊缝深度减少及热影响区变宽；③焊件的变形量增大。

由上述可知，有利于提高焊缝质量的工艺条件有：①镀锌板平整，镀锌层厚度均匀；②激光光斑尺寸小，功率密度高；③焊接速度快。锌蒸气容易损害光学元件，激光焊时最好是用喷嘴把它们吹走或是用排烟装置排除。

8）异种金属的激光焊　异种金属的激光焊是指两种不同金属的激光熔焊。异种金属是否可焊及接头的强度如何，取决于两种金属的物理性质，如熔点、沸点等。若两种材料的熔、沸点接近，能形成较为牢固连接。激光焊接的参数范围较大，熔区可以形成良好的合金结构。依据这些性质可以把它们分成两种情况，如图 5.1-27 所示。

如图 5.1-27 所示，设金属 A 的熔点为 $A_{熔}$，沸点为 $A_{沸}$；金属 B 的熔点为 $B_{熔}$，沸点为 $B_{沸}$；且 $B_{沸} > A_{沸} > B_{熔}$、$A_{沸} > B_{沸} > A_{熔}$，则金属表面温度可以在 $A_{熔}$ 与 $B_{沸}$ 之间调节。$A_{熔}$ 与 $B_{沸}$ 之间差距越大，激光焊接参数范围越大。如图 5.1-27a 所示金属 B 的沸点高于金属 A 的熔点，两温度构成了一个重叠区，在焊接过程中若能使焊缝材料的温度保持在重叠区范围内，则两金属能发生熔化或气化，实现焊接。重叠区所代表的温度范围越大，两金属焊接参数的可选范围越宽。反之，当一种金属熔点比另一种金属沸点还高，即 $A_{熔} > B_{沸} > B_{熔}$ 时，则两种金属形成牢固熔焊的范围很窄，甚至



(a) 金属 B 的沸点高于金属 A 的熔点

$B_{熔}$ $B_{沸}$ $A_{熔}$ $A_{沸}$ 温度

(b) 金属 A 的熔点和金属 B 的沸点相差较远

图 5.1-27　两种金属的熔点、沸点示意图

不可能。如图 5.1-27b 所示金属 A 的熔点与金属 B 的沸点相差较远，这两种金属很难焊接，其原因是两金属不能同时发生熔化，从而无法形成牢固的接头。针对这种情况，可以采用在两金属中间加入第三种金属的方法（焊接材料）。所选的第三种金属作为焊接材料，既能与金属 A 结合，也能与金属 B 结合，即它们的熔点、沸点如图 5.1-27a 所示。例如，小型继电器的组装需要把银－镁－镍合金片与镀银的合金或铁基合金连接起来，这两种合金很难直接焊接，为此选用锌白铜合金作为焊接材料，先把它与银－镁－镍合金焊牢，然后再把焊接材料焊到镀银的合金上，取得了良好的连接强度。

激光焊接可以在许多类异种金属之间进行，研究表明，铜－镍、镍－钛、钛－钼、低碳钢－铜等异种金属在一定条件下均可以进行激光焊接。

不同材料之间的激光焊接只有某些特定的材料组合才有可能。由于熔化区小而且焊缝结晶速度快，激光焊接可以焊接的不同材料组合比其他焊接方法要多。

另外，不锈钢－铜、可伐合金－铜、普通碳钢－硬质合金以及因瓦镍合金－不锈钢间也可以采用激光焊接。

9）非金属材料的激光焊接　激光还可以焊接陶瓷、玻璃、复合材料等。对陶瓷连接的最主要要求是不能损害它的优良性能。常规方法如机械连接、钎接和有机剂黏合都不能获得紧密、强固和耐热接头，电子束焊接也不能得到性能可靠的接头。为了确保激光焊接的优质接头，焊接陶瓷时需要预热以防止裂纹产生，一般使用电炉预热到 1 500℃，然后在空气中在千瓦级激光束照射下进行焊接，通常采用长焦距的聚焦透镜。为了提高接头强度，焊接时也可以增加填充焊丝，并在室温至 700℃工况下性能不会变坏，其接头抗热冲击性与基材一样高。

焊接金属基复合材料（Metal Matrix Composites—MMCs）时，易产生脆性相，这些脆性相会导致裂纹以及降低接头强度，虽然在一定条件下可以获得满意的接头，但总体仍处于研究阶段。

3.6　激光焊缝组织和常见缺陷

3.6.1　焊缝组织

高功率密度的激光可以使材料的熔化在很短的周期内完成，并以很快的速度凝固，导致焊缝组织与常规熔焊组织区别较大。激光焊缝的组织细，热影响区窄，经常含有较多的非平衡组织，相的固溶度通常较高，例如，热影响区中马氏体的碳含量就较常规马氏体高。激光焊焊缝是较细的凝固组织，结晶金属的形貌受激光焊参数影响，快的焊接速度有利于形成细的焊缝组织。

对于钢材料，在接头的热影响区存在一个很窄的固态相变区，该区受热发生奥氏体相变。由于激光加热周期短的缘故，钢中的渗碳体或铸铁中的石墨很难实现均匀化，导致在渗碳体或石墨的原位生成的奥氏体含碳量高，其他区域奥氏体的含碳量低。高碳奥氏体相难以实现完全的马氏体相变，造成组织中有较多残余奥氏体。残余奥氏体是非平衡组织，它能在应力的诱发下转变成马氏体，降低接头的韧性。

3.6.2　焊缝质量

激光深熔焊接输入比能小、焊速高、冷却速度快，因而不仅熔化区深而窄，热影响区也很小。高的冷却速度使焊缝金相组织变细，有利于提高焊缝的强度和韧性。

CO_2 激光焊接还有净化熔化区的作用，这是由其焊接过程的基本特征所决定的。金属对 CO_2 激光有高反射率，而金属中的杂质，如金属氧化物、硅酸盐和硫化物等则对 CO_2 激光具有高的吸收率。例如，氧化钛吸收入射激光的 98%。在深熔焊接过程中，激光在小孔壁上经历多次反射和吸收，如果激光在孔壁上碰到的是纯净的液体金属，则大部分光被反射，仅有少部分被吸收，相反地，如果激光碰到的是非金属杂质，则大部分吸收，从而激光选择性地将杂质加热气化，从熔化区中排除。当然，激光焊接净化的前提是采用惰性气体对焊接区加以有效的保护，使之不受大气污染。

激光焊接熔化区的净化效果已为高强度合金钢、管道钢等的焊接实践所证实。分析检验表明，高强钢熔化区的含氧量可比母材下降 50%，熔化区的非金属杂质比母材少，且更弥散，从而显著改善焊缝的机械性能，提高其抗冲击韧性以及抗拉强度。

3.6.3　焊缝缺陷

激光焊焊缝的缺陷有多种，有由焊缝对气体的吸入引起的焊缝气孔，有由组织应力和热应力引起的裂纹，还有由于零件的配合精度不够造成的接头表面高低不平、扭曲变形等。这里只对气孔和裂纹进行讨论。

1）气孔　气孔是激光焊接过程中最常出现的缺陷，是深熔焊接的一个直接结果。激光焊接时由于焊缝深而窄，冷却速度又快，因此焊接过程中产生的气体不一定有足够的时间从熔化区中逸出，滞留在焊缝中形成气孔。对于非穿透焊缝，问题比较严重，较易在焊缝的根部出现分散的气孔。这种情况在电子束焊接中也常出现。但是由于激光焊接的冷却速度快，如果出现气孔，其直径也比传统熔焊中的气孔直径小。

某些材料易于在焊接过程中产生气孔。例如，镀锌钢板、含镁合金在焊接过程中因锌、镁挥发而生气孔，沸腾钢在焊接过程中熔池发生化学反应产生气体。某些铝合金对气体有高的溶解度，在焊缝结晶过程中释放气体。用激光焊接这些材料时必须特别注意防止产生气孔。

降低熔化区气孔率的方法包括：焊前清洗，焊接过程中用惰性气体充分保护焊接区和选择较低冷却速度的焊接参数（较低的焊速、预热等）。一个正面较宽、背面较窄、略带斜度的 V 字形焊缝有利于气体逸出和减少气孔。

气孔形成原因如下。

① 材料本身含有一定量的气体，例如，钢中通常含有炼钢时遗留下来的氧或其他气体。

② 低熔点金属的强烈汽化，如镀锌钢板表层的锌或者是母材中某些元素的汽化。

③ 熔池中进入了空气。

④ 焊件表面的油、锈、水分和油漆等物质进入了焊缝。

很明显，母材的高纯度、合适的接头形式、保护气体的正确使用及焊前焊件表面的清理，都有利于减少焊缝气孔。外观呈球形，直径小于 0.2 mm 的较小气孔在一般焊缝中也常出现，数量少时不一定就构成危害，但数量多时会使焊缝截面积减小，降低焊缝的抗拉强度。气孔均匀分布时，危害程度会小一些。氢是钢中的有害气体，由于激光焊的焊接速



度较快，所以不利于氢气从焊缝中逸出。深熔焊接时焊缝气体较难排出，易出现气孔。若采用穿透熔化激光焊、低焊接速度和焊后热处理等方法，可减少焊缝气孔。

2）结晶裂纹　结晶裂纹通常在合金的固相线以上温度发生。激光焊焊缝中的熔化金属在液－固相线之间结晶及生长，金属由液态到固态的转变会发生体积收缩，产生收缩应力而导致产生裂纹，其生成部位通常是焊缝的最后凝固区。一般来说，激光焊接过程中产生裂纹的原因和传统焊接工艺相同，激光焊焊缝的液态金属较难充分凝固，所以内应力通常较一般焊接大，形成裂纹的倾向也就大一些。对于钢铁材料，半熔化区中的固态组织中含有大量奥氏体，激光焊缝的冷却速度快，足以使奥氏体转变成马氏体，这种组织应力会增加裂纹产生倾向。裂纹常起源于低熔点共晶。激光焊焊缝中的S、P和B元素会增加裂纹形成倾向，而添加适量的Mn可抑制裂纹的产生。

另外，淬火裂纹同样限制了高碳钢、高合金钢的激光焊接。激光焊接的冷却速度高，结晶过程中的偏析减少，脆性的或低熔点的金属化合物往往来不及析出，从而降低了焊缝的热裂倾向。但高的冷却速度增加了焊缝金属的淬硬倾向，较易产生淬火裂纹。因此可以通过预热、加焊丝或调整焊接参数来减少以至消除裂纹。

总之，焊件的精密配合，减少应力集中的合理接头设计，以及采用焊前或焊后热处理等，都可以收到减少裂纹的效果。

3.7　激光焊接技术新发展

激光焊接因其诸多的优点广泛应用于各行各业，激光焊接复合技术是激光焊接技术的发展方向，该技术是指将激光焊接与其他焊接方法组合起来的集约式焊接技术，其优点是能充分发挥每种焊接方法的优点并克服某些不足。

3.7.1　偏心回旋光束激光焊

激光焊对焊件装配间隙要求较高，因聚焦光斑直径一般要小于0.25 mm，如果装配间隙大于0.25 mm，当光斑对准间隙中线时光束便穿过间隙而不能使焊件熔化。要求装配间隙小于0.25 mm，在生产中有时很难保证。为了降低对装配的要求，1985年C.J.Dawes研制了一种偏心回旋光束激光焊，研制了光束回旋装置。在聚焦透镜下加一个厚6 mm、直径50 mm的KCl平镜片，倾斜15°，并由一个125 W的变速电动机（<4 000 r/min）通过皮带带动镜片旋转。用这种方法可以在不影响焦斑尺寸和形状的条件下使焦斑偏离原中心0.5 mm的半径作回旋运动。在焊件以速度 v（mm/s）运动时轨道参数 p 可以由下式决定

$$p = 2\pi fr / v$$

式中，f 为回转频率，Hz；r 为回转半径，mm。

在厚2 mm及4 mm的低合金高强度钢板上进行的实验证明，光束作偏心回旋的效果：在2 mm厚的钢板上，能将容许装配间隙从0.14 mm增大到0.25 mm；在4 mm厚的钢板上，从0.23 mm增大到0.3 mm。并使光束中心与焊缝中心的对准容许误差每边至少为0.5 mm，而不回旋时则只有0.25 mm。

3.7.2　水下激光焊

G.Sepold等在1983年进行了水下激光焊试验，研制了图5.1-28所示的光路系统，用三片非圆抛物面反射镜，使激光通过一个小孔进入气压较高的下室，再通过另一个孔照到焊件上。焊件置于200 mm深的水中固定不动，激光光斑在工件上扫描。试验用钢为St52－3级（0.15% C，0.35% Si，1.29% Mn，0.028% P，0.025% Al），6 mm厚。激光功率4 kW，扫描速度14 mm/s，光斑直径0.8 mm，聚焦辐射角0.25rad，得到了全焊透，焊缝质量好，氢含量15～20 mL/100 g，低于其他水下焊接法所规定的容许值。也未发现由于水冷导致焊缝变脆的现象。

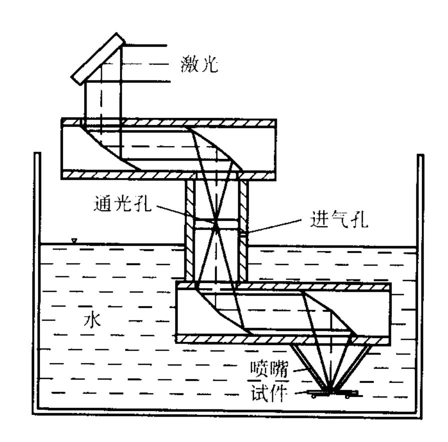


图5.1-28　水下激光焊接系统及焊接试验装置示意图

3.7.3　激光－高频焊管与激光焊管

高频感应焊管现已在全国推广使用。不锈钢管高频焊因参数要求太严，目前国内外使用氩弧焊的仍较多，因此对将激光应用于焊管十分关切。直缝高频焊管主要是利用高频电流在尖劈形管缝口所形成的电路上的集肤效应与邻近效应，使管缝口迅速加热至接近熔化并经加压辊挤压而完成焊接过程。而尖劈形的两侧面恰又形成对激光的多次反射面而有利于激光的集聚和吸收。1986年日本钢铁公司的K.Minamida等正是根据上述道理而提出了在高频焊管时加一道激光束，成为激光－高频焊管，并认为高频加热在棱角处深，厚度的中部浅，如在中部用激光束加以补充，可以使得全厚度上加热更加均匀，如图5.1-29所示。以两个板条为焊件的激光－高频焊示意图见图5.1-30。Minamida所用高频设备参数：频率300 KHz，输出功率400 kV·A，最大焊接速度67 m/min，管壁厚度5～20 mm，挤压力最大为20 t，开口角3°～10°。激光器为横流 CO_2 激光器，输出功率：A，最大4 kW；B，最大15 kW。光路系统中反射镜均为Cu镜镀金，M1为凸面，焦距 f_1 = 725 mm，M2为凹面，焦距 f_2 = 1 300 mm，焦斑直径3～12 mm。采用这样的系统可以使焊管的产量和质量都有所提高。

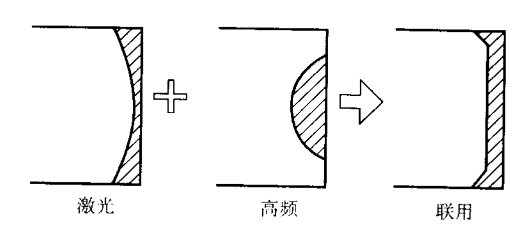


图5.1-29　用激光补充高频加热示意图

1988年联邦德国的K.Behler等提出利用偏振光进行直缝焊管。直边劈形尖角遇激光多次反射到一定路程后会折返，而弯曲的两边才能把激光反射集聚到顶点（见图5.1-31）。焊管时的劈形区两边正是弯曲的，但对与劈面平行的P－偏振光，吸收激光的部位过早。用与劈面垂直的S－偏振光，前部不吸收激光，而将激光聚焦到焊接点（见图5.1-32）。一般焊管是将激光垂直照射到焊缝会合点形成匙孔焊接。新法S－偏振光在劈面内导入，要比匙孔焊接方法快10倍。

3.7.4　激光压焊

图5.1-33是采用激光压焊对薄钢带焊接示意图。对薄



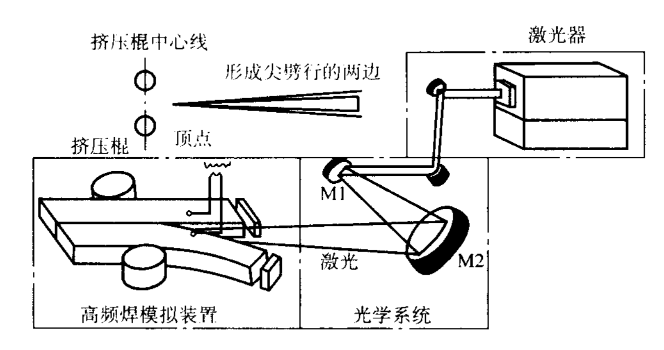
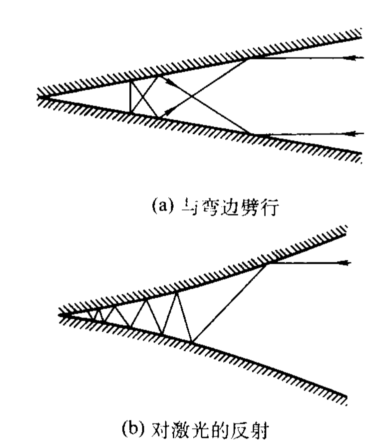


图 5.1-30　激光－高频焊示意图



(a) 与弯边劈行

(b) 对激光的反射

图 5.1-31　直边劈行

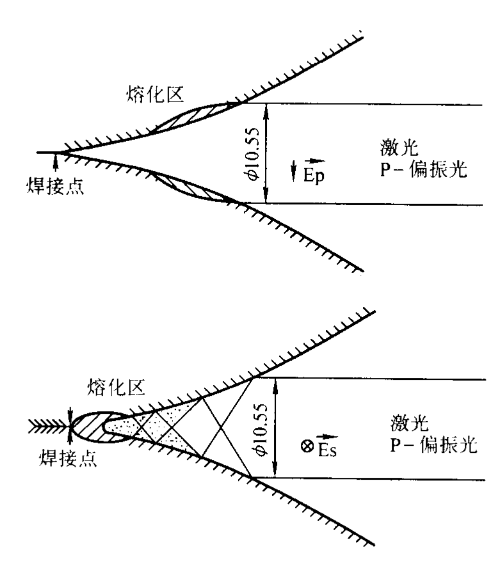


图 5.1-32　焊管时管边对偏振光的吸收情况

钢带进行激光熔焊时，如果焊接速度大于 30 m/min，往往出现缺陷，而采用如图所示的方法时，待焊的两薄钢带通过导槽形成60°的张角，经过聚焦的激光束照射到两薄带之间，在上下两压辊的作用下，两钢带在未熔化前被压焊在一起，其结果是不仅焊缝强度很好，而且焊接速度亦达到 240 m/min，是原来的 8 倍。

3.7.5　激光－电弧焊

W. M. Steen 等将电弧与激光联用收到奇特的效果，其装置如图 5.1-34 所示。

2 kW 激光器与 250 A 的 TIG（钨极氩弧焊）焊机联用，保护气体氦气用同轴喷嘴，直径 3 mm，喷嘴与工件距离 3 mm，试件下面放钨阴极，氩气保护，用 450 kHz 的振荡器

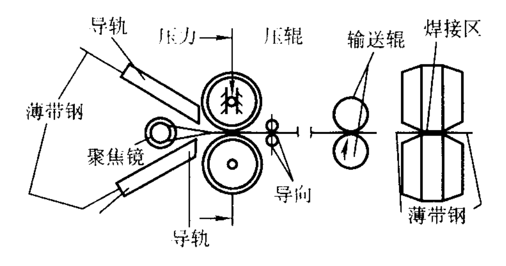


图 5.1-33　采用激光焊接对薄钢带焊接示意图

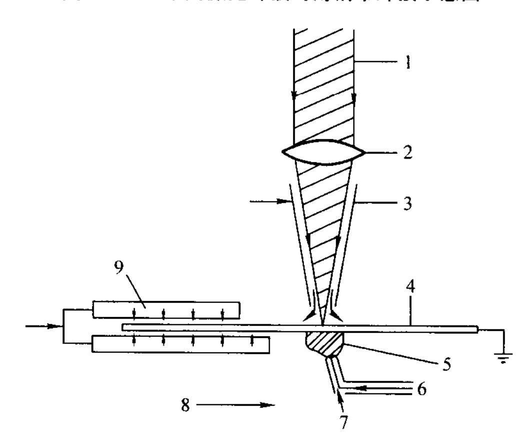


图 5.1-34　电弧－激光焊示意图

1—激光束；2—KCl 透镜聚焦，$f = 75$ mm；3—氦气保护
4—工件（接正极）；5—电弧；6—钨阴极；7—氩气；
8—焊接方向　9—氩气保护

起弧。试件用 0.2 mm 厚的镀锡铁皮，焊速单用 800 mm/s。单用激光时熔深不到板厚的 1/4，单用电弧时（25 A）根本不熔化，二者联合使用，便能全部焊透，即增加 200 W 的电功率便可以将效果提高 4 倍。

小电流电弧单独使用时电弧不稳定，但遇到激光照射所生成的热点时（应高于 300℃），因热点使电弧的阳极功率减小，降低了弧柱电阻而成为稳定的弧根。这可能是激光与电弧联用能奏奇效的原因。

在工件背面加电弧，背面热点温度应高于 300℃。所以，在激光功率一定时，必须有一上限焊接速度。在上述试验中用 1 320 W 激光功率时最高焊接速度可以达到 1 m/s。

这种方法试用于厚 0.2 mm 的材料时效果显著，厚度大时背面热点温度难以保证。此法试用于食品罐头筒焊接极为有效。

图 5.1-35 和图 5.1-36 分别是激光－TIG 和激光－MIG（熔化极氩弧焊）复合焊接法示意图。

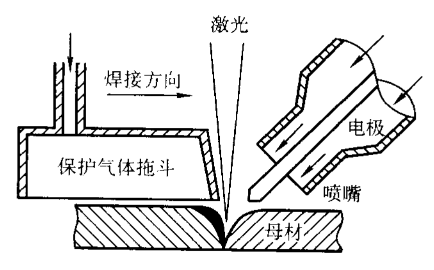


图 5.1-35　激光－TIG 复合焊接法示意图

进行这种复合焊接的主要优点是：

1）有效地利用激光能量　母材处于固态时对激光的吸收率很低，而熔化后可以高达 50%～100%。采用复合焊接法时，TIG 电弧或 MIG 电弧先将母材熔化，紧接着用激光照射，从而提高母材对激光的吸收率。



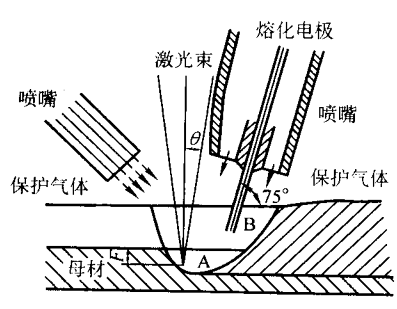


图 5.1-36 激光－MIG 复合焊接法示意图

2）增加熔深 在电弧的作用下，母材熔化形成熔池，而激光束又作用在电弧形成熔池的底部，加之液体金属对激光束的吸收率高，因而复合焊接较单纯激光焊接的熔深大。

3）稳定电弧 单独采用电弧焊时，焊接电弧有时不稳定，特别是在小电流情况下，当焊接速度提高到一定值时会引起电弧飘移，使焊接无法进行。而进行激光－电弧复合焊接时，激光产生的等离子体有助于稳定电弧。

图 5.1-37 为单纯 TIG 焊接和激光－TIG 复合焊接时，电弧电压和电弧电流的波形。图 5.1-37a 中焊接速度为 135 cm/min、TIG 焊接电流为 100 A，可以看出，复合焊接时，电弧电压明显下降，焊接电流明显上升。图 5.1-37b 中，焊接速度为 270 cm/min 、TIG 焊接电流为 70 A，可以看出单纯 TIG 焊接时，电弧电压及焊接电流均不稳定，很难进行焊接，而与激光进行复合焊接时，电弧电压和电弧电流均很稳定，可以顺利进行焊接。

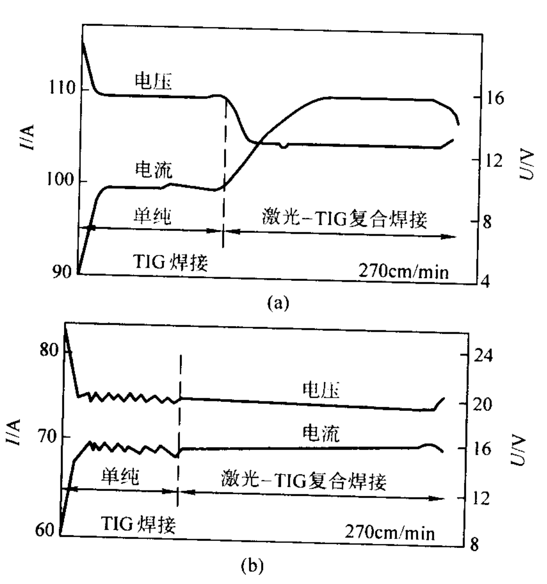


图 5.1-37 单纯 TIG 焊接和激光－TIG 复合焊接时电弧电压和电弧电流的波形

3.7.6 激光钎焊

（1）激光软钎焊

激光软钎焊主要用于印刷电路板的焊接，尤其在表面安装技术 SMT（Surface Mount Technology）中用于片状元件的组装。激光软钎焊的主要优点是：

1）局部加热，热影响区小，元件不易产生热损伤，可在热敏元件附近施焊。

2）非接触加热，不需任何辅助工具，可在双面印刷板上进行双面装配后同时焊接。

3）重复操作稳定性好，激光功率和照射时间易于控制，成品率高。

4）光容易实现分光，通过半透镜、反射镜、棱镜、扫描镜等可对激光进行空间上的分割，能实现多点同时焊。

5）波长为 1.06 μm 的激光可用光纤传输，可达性好，灵活性好。

6）聚光性好，易于实现多工位装置的自动化。

由于 Nd：YAG 激光可用光纤传输，钎料对其反射率又比 CO_2 激光低，且光学系统廉价，因而被广泛采用。

在 SMT 中进行激光软钎焊时，激光束对材料主要有三种作用方式：光点移动法、线状光束照射法以及扫描法。

① 光点移动法激光钎焊，其示意图如图 5.1-38 所示。激光束光点对准所焊部位，使钎料熔化，产生一定范围的流动，直至钎料覆盖整个连接区。

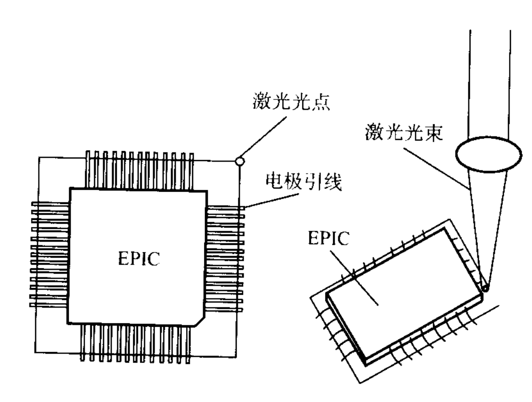


图 5.1-38 光点移动法激光钎焊示意图

光点移动，既可移动光束，也可移动工件。移动光源时，多采用机器人，移动工件时，可采用数控工作台。

光点移动法激光钎焊所需激光功率较小，一般 15 W 左右，每个焊点所需时间为 20～40 ms。激光输出的通断由谐振腔内的光快门控制。

② 线状光束照射法激光钎焊，如图 5.1-39 所示。该方法采用柱面透镜将光束聚焦为线状，集成电路一侧的若干引线经一次激光照射即可完成钎焊，因而缩短了焊接时间。若将激光束分割为平行的两束光，则一次可完成两侧引线元件的焊接，因而对四向引线元件仅需二次激光照射。

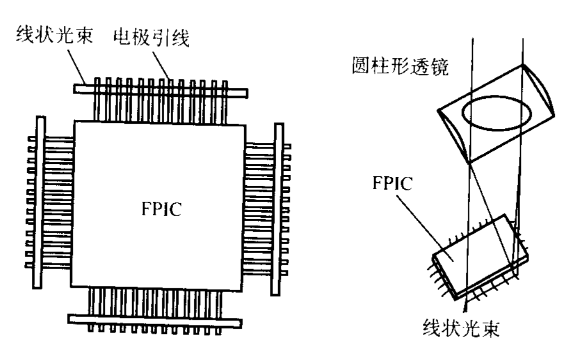


图 5.1-39 线状光束法激光钎焊示意图

③ 扫描法激光钎焊 如图 5.1-40 所示。YAG 激光经光纤传输后通过电动机带动反射镜实现往复扫描。这种方法是把局部加热的激光束变成了线状光束后，照射到若干个部位进行钎焊。

（2）激光硬钎焊

激光硬钎焊在有色金属的连接中优越性较大，目前，对 Ag 、Ni、Cu、Au 和 Al 基材料的硬钎焊获得良好的效果。

图 5.1-41 是激光加丝硬钎焊示意图。焊接时，聚焦光斑直径、离焦量、钎丝位置都十分重要，只有正确选择，才能保证过程的正常进行。



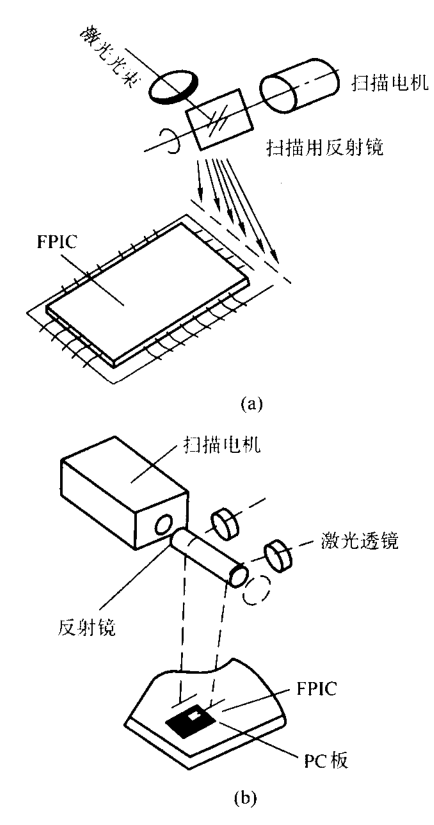


图 5.1-40 扫描法激光钎焊示意图

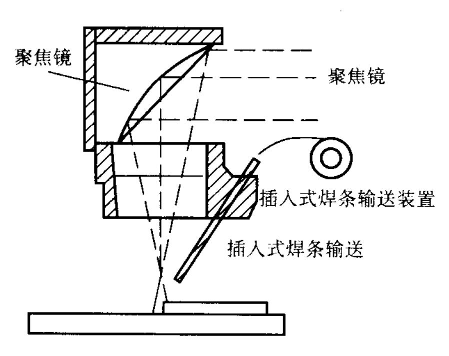


图 5.1-41 激光加丝硬钎焊示意图

4 激光表面处理技术

4.1 概述

科学技术的发展，对精密机器及零部件的精度、性能和寿命的要求越来越高，其使用环境也变得更加苛刻，许多机器必须在高压、高温、高腐蚀气体及高真空中工作。可以这么说，凡是在实际使用中担当某一功能的零部件，都要求其表面具有一定的力学性能和组织结构。为此。人们研究开发了多种表面处理技术与工艺来改善材料的表面性能，以满足日益增长的需求。传统的金属表面处理方法有：表面硬化法(高频淬火、火焰淬火、渗碳淬火及渗氮等)、扩散渗透表面处理法（锌扩散渗镀法、铬扩散渗镀法、硅扩散渗镀法及硼化处理等)、金属保护膜法（电镀、熔融浸镀、金属喷镀、化学镀及真空蒸镀)、防锈保护膜法（铝及铝合金的防锈保护膜、镁合金的防锈保护膜等)、电化学处理（电解抛光和化学抛光、阳极氧化)、喷丸处理、孔冷挤压及干涉配合等技术。这些表面处理技术的广泛应用，产生了显著的经济效益，但也有一定的局限性。从 20 世纪 70 年代以来，高能激光束、离子束及电子束用于材料的表面处理，从而开辟了材料科学中最引人注目、最富有生命力的新领域。

激光表面处理技术在汽车、机械、航空等工业部门日益受到广泛的重视和推广，用于处理发动机零部件、回转配合体零件以及涡轮叶片等，在经济效益和项目开发上呈不断上升的趋势。

近几年来，激光表面处理技术在模具制造业中的应用也日益加强。在生产过程中，模具表面承受着各种形式的复杂应力，包括摩擦、挤压等，这将限制模具的使用寿命。用激光表面强化技术能有效解决传统强化技术难以实现的技术指标，不但能提高模具表面强化硬度（比常规方法平均高15%～20%)，从而提高模具的耐磨性，而且模具表面激光强化最后一道工序，不必进行后续加工，工件几乎不变形。这在很大程度上可简化模具制造工艺。

据美国 1998 年对 124 个工厂的调查结果表明，18%的厂家希望扩大激光表面处理技术的能力。激光表面处理技术的发展，也改变了传统的新产品开发设计方法，将来从事新产品设计的专家不仅要懂得材料知识，而且还需要具有丰富的激光加工知识。零件经激光表面强化处理后，其附加值将成倍增加。常用材料及零部件经激光表面处理后，提高了性能，延长了使用寿命，获得了巨大的经济效益。采用激光处理具有如下突出优点：

1）激光是一种高密度能源，可快速、局部地加热材料，并实现局部急热和急冷，可用于其他方法不能处理的沟槽类零件的处理；

2）易于处理高熔点材料、耐热材料及高硬度材料等；

3）可在大气、真空及各种气体环境中进行处理；

4）可改变激光参数，实现不同的表面处理工艺；

5）是一种非接触式处理，工件变形极小，省去校直和精磨等工序；

6）由于激光束易于导向，聚焦实现作各方向变换，并极易与数控系统配合，对复杂工件表面进行处理，因此激光表面处理是一种极具柔性的加工方法。

随着大功率激光器的出现，激光被用于材料的表面改性处理，出现了众多的激光表面处理新技术。由于激光表面处理技术是近 20 年才发展起来的新技术，所以，目前人们对此还没有形成统一的称呼。除了“激光表面处理”之外，还有“激光强化”、“激光热处理”及“激光表面优化”等名称。根据激光与物质相互作用所产生的效应不同，可将众多的表面处理技术分成两大类。第一类主要利用激光产生的力学效应，即激光与材料相互作用所产生的热应力或冲击波(应力波）来改善材料的性能或形状。第二类主要利用激光与材料相互作用所产生的热效应来改善材料的性能的表面处理技术。后者又可分为两类，即将材料表面加热到非熔化状态的处理技术和将材料表面加热到熔化状态的处理技术。如图 5.1-42 所示。

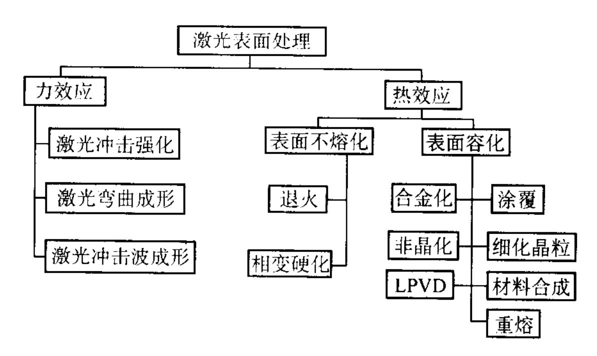


图 5.1-42 激光表面处理技术分类



4.2 激光相变硬化

4.2.1 概述

激光相变硬化（又叫做激光淬火）是通过高能（能量密度可达 10^3 ~ 10^5 W/cm²）激光束扫描工件表面，表层材料吸收激光光能并转化为热能，然后通过热传导使周围材料温度以很高的升温速率（10^5 ~ 10^6 ℃/s）达到奥氏体相变温度 T_{AC1} 或 T_{AC3} 以上、熔点以下，当光束移走以后，通过材料基体的自冷却作用使被加热的表层材料以超过马氏体相变临界冷却速率（10^4 ~ 10^6 ℃/s）而快速冷却，从而完成相变硬化。由此可以看出，激光相变硬化过程分为三个阶段：激光直接与表层材料作用，表层材料吸收光能并转化为热能的阶段、加热升温阶段和冷却降温阶段，经过这三个阶段以后，材料表面就会形成一定尺寸、一定组织成分的硬化区。

由于激光相变硬化所使用的加热源——激光本身的特点，激光相变硬化具有以上所列的激光表面处理的优点。激光相变硬化加热速度和冷却速度大大超过常规淬火，最终相变硬化区内可获得极细的马氏体组织，且晶粒的位错密度比较高，但硬化区深度较浅。另外，为了增大金属工件表面对光能的吸收率，处理前需要对工件表面进行预处理，工件进行激光相变硬化处理后，需要对工件表面进行清理。

4.2.2 应用研究现状

自1960年第一台红宝石激光器诞生以后，激光作为强相干光源广泛应用于工业、农业、通讯和信息处理、能源动力、医疗卫生、军事等行业。与应用目的相对应的出现了很多激光应用方向，如激光表面处理、激光制备材料、激光去除材料等。激光相变硬化就属于激光表面处理技术。

表5.1-17中列出了一些激光相变硬化技术应用于处理发动机汽缸（缸孔或缸套）内壁的部分情况。除此以外，德国大众、日本丰田等一系列名车厂家都相继将这一技术引入汽车生产线，大大提高了发动机缸体的耐磨性，同时改善了缸体与活塞环的配合性，使活塞环的磨损同样减小。美国的TANI，G.F.BENEDICT等人以及西屋电器公司、尼桑汽车公司、日立公司等也都申请了齿轮激光热处理工艺的多项专利。国内大连机车车辆厂也拥有用于机车曲轴、缸套、立簧片的激光热处理生产线。另外在全国各地还建立了不同规模的激光加工中心，为各行业机器零件进行激光热处理。

表5.1-17 激光相变硬化应用发动机气缸处理概况

单位名称	应用情况简介	应用效果
美国通用汽车公司	1974年采用激光表面相变技术对汽车转向器壳体内腔（可锻铸铁）进行处理。该公司在20世纪80年代已有17条激光表面相变处理生产线，日处理33 000件	耐磨性提高10倍
意大利菲亚特公司	采用HPL-10型激光器处理缸孔内壁	取消了缸套，降低了油耗，节省了成本
德国奥格斯堡-纽伦堡机械制造有限公司	1984年建立激光淬火生产线对大型发动机缸套进行激光淬火，淬火带的布局有交叉网纹式、螺旋线式和正弦波式	缸套耐磨性大大提高
西安内燃机配件厂	与华中理工大学合作在“七五”、“八五”期间建成六条缸套热处理生产线，采用轨迹为螺旋线	硬化层宽2.0 mm，深0.3 mm，表面硬度达54~59HRC，耐磨性比各种合金铸铁缸套及中频淬火缸套提高42%，与之相配活塞环耐磨性提高30%以上
长春一汽集团	建立有热处理生产线，对CA141汽车发动机气缸体进行处理，取消了缸套	淬火带宽4.0 mm，深0.4 mm，缸孔硬度从206HV提高到689HV，大修里程提高到20万公里
北内集团	目前已建立有年处理约3万台汽车发动机的二氧化碳激光热处理生产线。而且正由大恒公司牵头，欲引进日本Q493柴油发动机生产线建设配套的激光热处理生产线，生产能力达到单班车4万台	降低了材料成本、废品率，同时还对“激光淬火灰铸铁”做了许多理论研究
青岛中发激光技术有限公司	该公司采用激光网格工艺加工后的发动机缸孔、曲轴等零件的表面	硬度可达55HRC以上，寿命提高3~5倍，该工艺及设备已经为用户加工数万件汽车零部件
北京切诺基吉普车公司	建立了年处理约3万台汽车发动机的二氧化碳激光热处理生产线	
中国大恒公司和北京首汽公司合作	将这项技术应用于汽车修理行业	平均万公里磨损量降低

4.2.3 激光相变硬化的理论基础

1）有关激光相变硬化机理的基础知识　铁基材料相变硬化（又称为淬火）的原理是将材料加热到临界温度 A_{c3} 或 A_{c1} 以上一定温度，然后以大于临界淬火速度的速度冷却，最终形成马氏体或贝氏体组织。按常规，马氏体形成需要满足两个条件：温度升高到 A_{c3} 或 A_{c1} 以上，熔点以下；冷却速度达到马氏体生成的临界冷却速度。激光相变硬化处理铁基材料时，这两个条件同样要满足。大多数研究人员公认的结果就是：在激光相变硬化中，只要保证材料温度达到相变温度以上（激光相变硬化自身特点保证了冷却速度符合要求），就能成功地硬化材料；而要达到所要求的硬化深度只要使该深度处的温度达到奥氏体相变临界温度等温线所涉及的温度，就能达到满意结果。但实际的试验表明，除了要满足一般淬火中马氏体形成所需要的两个基本条件，还必须要满足其他条件，才能成功硬化材料。

淬火的具体微观过程就是：加热过程中，C、Fe原子扩

散，最终形成奥氏体（C 原子在 $\gamma-Fe$ 中的固溶体）；冷却过程中，当冷却速度大于马氏体形成的临界冷却速度时，$\gamma-Fe$ 切变成 $\alpha-Fe$，最终形成马氏体（C 在 $\alpha-Fe$ 中的固溶体）。只有在奥氏体化过程中，C 原子充分扩散才能最终形成马氏体。常规淬火，为了保证碳原子充分扩散，在加热和冷却阶段之间有保温阶段；而激光淬火由于加工过程连贯，没有保温阶段，它们的热循环曲线如图 5.1-43 所示，图中 T_M 为材料的熔点。激光淬火过程中利用激光快速加热工件表面，表层材料温度升高至 A_{c1} 以上，铁素体相 α 向奥氏体相 γ 转变，与此同时碳原子向奥氏体相中扩散。当激光束移走以后，通过材料自身的热扩散形成快速冷却，当冷却速度大于马氏体相生成的临界冷却速度时，形成马氏体实现相变硬化过程。碳原子的扩散与加热过程和冷却过程同步，这就可能导致激光淬火后，由于碳原子得不到充分扩散，在满足了马氏体形成所必须满足的两个条件后，硬化效果仍然非常不明显，这种情况在有保温阶段的常规淬火中不会发生。因此激光相变硬化成功的条件与常规淬火不同，它除了要满足常规淬火必须满足的条件，由于其自身的特性决定其要得到比较满意的处理结果，还要满足其他条件。这就是选择合适的工艺参数保证碳原子有充分的扩散时间，从而保证奥氏体中碳含量要满足一定的比例。

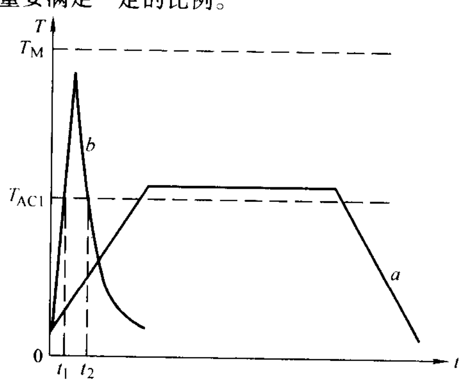


图 5.1-43　常规淬火 *a* 与激光淬火 *b* 材料中热循环曲线

用图 5.1-43 来进行说明，令 $\Delta t=t_2-t_1$，碳原子扩散主要就发生在 $t_1\sim t_2$ 之间（温度保持在 A_{c1} 以上的时间段）。如果 t 过短，碳原子就不能充分扩散，热处理后材料组织中马氏体含量必然会很低，硬化效果将非常不明显。根据式（5.1-37）：

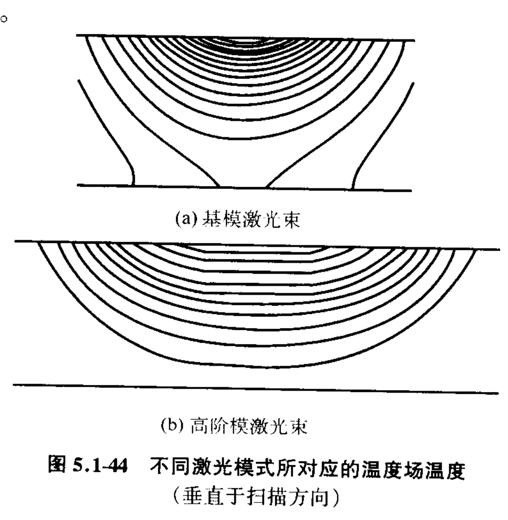
$$S^2 = 2D_0\int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{Q}{RT(t)}}\,dt \qquad (5.1\text{-}37)$$

式中，S 为扩散距离；D_0 为扩散常量；Q 为扩散激活能；R 为气体常数；t_1 为碳原子开始扩散的时刻；t_2 为碳原子终止扩散的时刻。

确定出此公式中相关参数，就可以计算出激光淬火铁基材料过程中所需要的 Δt 值，然后根据 Δt 选择合适的热循环曲线，根据热循环曲线来选择激光相变硬化的工艺参数。文献中给出了有关计算上述 Δt 值的具体方法，以及确定工艺参数的方法。

2）温度场　上文中讲过激光相变硬化过程包括三个阶段：激光直接与表层材料作用并转化为表层材料热能的阶段、加热升温阶段和冷却降温阶段。经过这三个阶段以后，材料表面就会形成一定尺寸、一定组织成分的硬化区。但是在激光直接与表层材料作用阶段，激光与材料直接作用所能达到的深度和直接作用时间，与最终硬化深度和持续时间相比极为短促。因此，在研究激光相变硬化过程中工件内部的温度场时，一般忽略研究此阶段，而是假设一个功率密度值等于所吸收的激光功率密度的热源作用于材料表面，在此前提之下，建立温度场模型，分析激光相变硬化过程中升温和降温过程。上文中已经提过温度场有一维、二维和三维温度场模型，一维、二维温度场模型只有在一些非常特殊的情况下才能简化为这种模型，相比之下三维温度场最具有普遍性。所以以下面将以三维温度场为例，介绍激光相变硬化过程中，温度场的知识及相关结论。

根据温度场模型，采用数值分析的方法可以得到垂直于光束移动方向的横截面内温度分布，如图 5.1-44 所示。其中图 a 表示激光模式为基模时的温度场分布，图 b 表示激光模式为高阶模时的温度场分布。根据横截面内温度场分布情况，结合一定的硬化带深度的判别准则就可得到激光相变硬化后，硬化带横截面形状，如图 5.1-45 所示。其中图 a 表示高阶模激光束加工得到的硬化带，图 b 表示基模光束加工得到的硬化带，由此可以看出高阶模得到的是平顶月牙形，基模得到的是月牙形，高阶模所得的硬化带深度相对均匀一些，这就从理论上解释了激光淬火多倾向于用高阶模激光的原因。



(a) 基模激光束

(b) 高阶模激光束

图 5.1-44　不同激光模式所对应的温度场温度
（垂直于扫描方向）

(a) 基模激光束

(b) 高阶模激光束

图 5.1-45　不同激光模式所对应的硬化带形状
（垂直于扫描方向）

上面介绍的都是通过数值模拟温度场来观察有关激光相变硬化处理铁基材料的理论结果，但我们的最终目的不仅是认识解释现有的试验结果，而是希望能够用理论来指导生产实践。

4.2.4　激光相变硬化的工艺

（1）预处理

就目前而言，激光相变硬化主要用于处理铁基材料的工件或试样，但是由于金属表面对激光，尤其是长波长激光的吸收率很低，所以在利用激光对金属材料进行热处理时，需要采取一定的措施提高表面对光能的吸收率，这就是预处理过程。目前预处理方法包括：磷化、表面涂层和应用辅助激光照射。前两者应用最为广泛。

1）磷化法　磷化法是将清洗净的工件放在磷酸盐为主的溶液中，浸渍或加温后在工件表面形成磷化膜，如磷酸锰、磷酸锌等，这样表面的能量吸收率可达 80%。

2）表面涂层法　激光处理前在工件表面涂一层能量吸收层，来提高能量吸收系数。当然要正常发挥作用，能量吸收层必须对所使用的激光波长吸收率高，稳定性好，导热性

好，易于与工件表面黏附和清除。

近年来国内外科研人员已经开发研制了有代表性的黑色涂料和氧化物。黑色涂料如 Crylong 1062 涂料，其主要成分为石墨粉和硅酸钠或硅酸钾。氧化物涂层有氧化锆涂层、云母粉加石墨粉等。

3）应用辅助激光照射法　该方法目前还处于现象发现和实验研究阶段，其现象为当用单种激光照射工件表面时，工件表面的能量吸收率很低，但是如果同时用另一种辅助激光照射，则表面能量吸收率大大提高。

（2）激光淬火工艺参数的选择

金属材料的激光相变硬化是一个多参数综合的工艺过程，在众多参数中，激光功率 P、光斑尺寸 D 和扫描速度 v 是主参数，所以下面重点讨论这几个参数的选择，并且在此过程中，将激光功率和光斑尺寸合为一个参数——激光功率密度来讨论。另外由于激光相变硬化处理材料时所使用热源为激光光斑，热源尺寸相对于工件来讲有可能会很小，所以必须采用一定的扫描方式对整个工件进行处理。扫描方式不同，工件使用效果也不同，所以下面我们也将对扫描方式作较为详细的介绍。

从激光淬火的实际应用要求考虑，评定硬化区的指标主要包括：硬化后表面变形量、硬化区深度以及硬化区内组织性能三方面。激光淬火后产生表面变形量主要是因为生成马氏体，材料体积膨胀而致。除了表面变形量要控制在一定范围内外，硬化区深度和硬化区深度内组织性能还要符合实际使用要求，也即所要求的硬化区深度以内，马氏体含量要达到一定的要求，以及马氏体的分布要尽量均匀，只有这样激光淬火才算成功。

1）激光功率密度　图 5.1-46 反映了激光功率密度与材料表面温度的关系，图中从曲线 No1 到 No3 激光功率密度不断增大。从图中可以看出，随着激光功率密度的增加，材料表面的温度不断升高。与此同时，研究人员的试验和理论结果都表明，材料的硬化深度随功率密度增加而变深。另外，从图 5.1-46 还可以发现一个现象，与不同激光功率密度相对应的各条曲线的宽度之间的变化不明显，这就是说，随着激光功率密度的变化，文献中所提出的保证 C 原子充分扩散的时间值变化不大。另外激光束光斑尺寸是决定硬化层宽度的主要因素，激光功率密度是通过激光光斑尺寸间接影响硬化层宽度的。

实际应用过程中，一般先根据使用要求确定硬化层宽度，然后根据硬化层宽度确定所需要的激光光斑尺寸，在此基础之上根据其他的硬度深度要求确定激光功率，最后得到需要的功率密度。

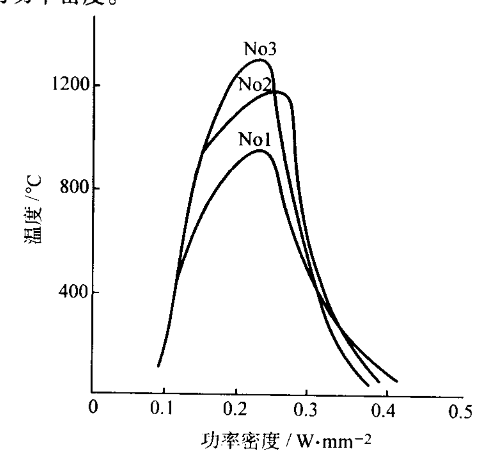


图 5.1-46　激光功率密度对材料表面温度的影响

2）激光扫描速度　图 5.1-47 反映了激光扫描速度与材料表面温度的关系，图中从曲线 No1 到 No4 激光扫描速度不断减小。随着扫描速度的增加，加热各点的时间缩短，在激光功率密度相同的情况下，材料能够吸收的激光能量份额小，最终使得材料表面温度下降，同时传入基体的能量也减小，材料硬化深度下降。从图 5.1-47 中可以发现与图 5.1-46 截然不同的现象。在图 5.1-47 中，与不同扫描速度相对应的曲线的宽度变化很大，而各热循环曲线的最高温度变化趋势却相对不明显。这就说明激光扫描速度对保证 C 原子充分扩散的 Δt 时间值影响较显著。即在激光功率密度相同的情况下，如果对硬化区内组织的均匀性要求较高，则激光扫描速度选择不能太大。

因此选择激光扫描速度，应在充分考虑生产效率的情况下，根据硬化区的硬度深度等要求选择合适的参数。当然如果对硬化区内组织的均匀性要求很高，激光扫描速度的选择就更要慎重了。

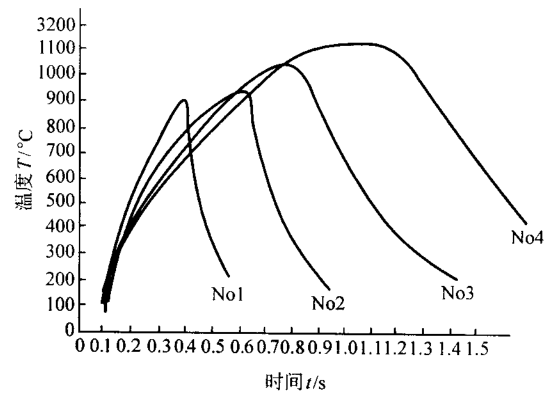


图 5.1-47　激光扫描速度对表面温度的影响

生产实践过程中，可以根据实际的生产条件，确定必须满足的参数条件，然后再根据硬化要求选择工艺参数。

3）激光扫描方式　激光扫描方式即激光在工件表面运动路径的分布。通过改变激光扫描方式可以调整硬化区域的分布，从而满足工件运转过程中的实际使用要求。所以研究激光扫描方式也就是研究工件表面硬化区域的合理分布。目前硬化区的分布方式有：网格状分布、块状分布、点状分布和其他分布，这些分布方式各有特点，分别适用于不同的应用场合。

① 网格状分布　如图 5.1-48 所示。这种分布方式在发动机汽缸内孔表面使用较多，加工过程中通过旋转运动和轴向运动相互结合改变激光扫描方式所得到。其特点是软硬基体交替出现，而且长期摩擦副长期磨合后，软基体表面被磨掉形成凹槽，这些凹槽可以储存和运输润滑油，从而改善摩擦副之间的润滑状况，提高零件的寿命。

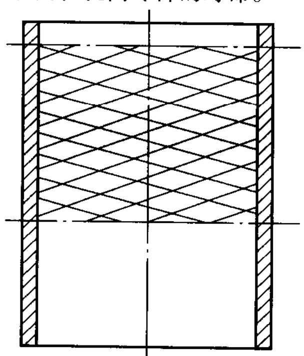


图 5.1-48　缸套内表面网格状淬火带分布示意图

在网格状淬火的过程中，需要考虑的因素有，组成网格的淬火带的宽度、网格间距、网格的交叉角度等。研究表

明，当采用网纹状时，硬化面积比例在30%～35%左右，夹角在40°～45°左右为最佳。这种方法目前应用较多。与网格状分布类似的还有斜纹分布方式，但其应用效果不如网格状分布。

② 环块状分布 如图5.1-49所示。这种分布方式是由日本的三菱重工业公司提出的。这种分布的特点与网格状分布类似，工件表面也是软硬交替，工件磨合后也形成储油沟槽，但是在沿垂直于环状硬化带方向，润滑油不能进行输送，而且其加工相对较为复杂。

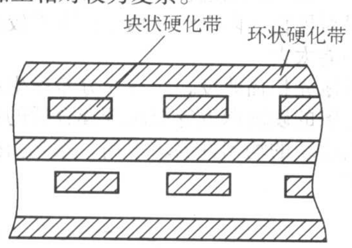


图5.1-49 环块状淬火示意图

③ 点状分布 如图5.1-50所示。这种分布方式加工淬火区域以点状分布在工件表面。其优点是灵活性较大，可以根据实际需要精确调整硬化区面积。这种分布需要确定的主要是硬化区面积，该面积的大小与被加工的材料等因素有关。

(3) 激光淬火处理后组织性能的概述

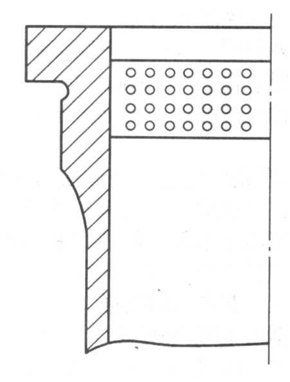
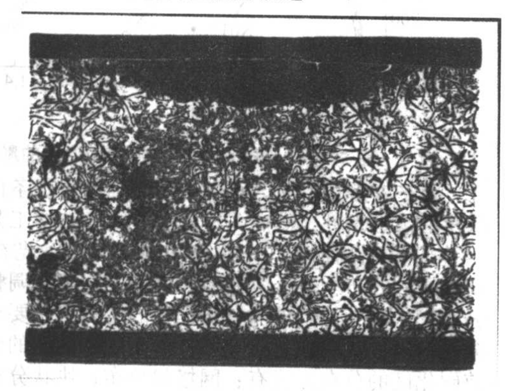
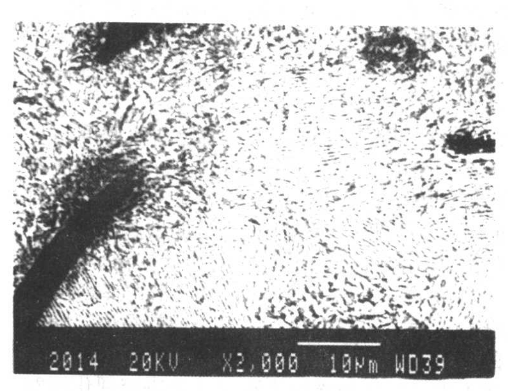


图5.1-50 点状淬火示意图

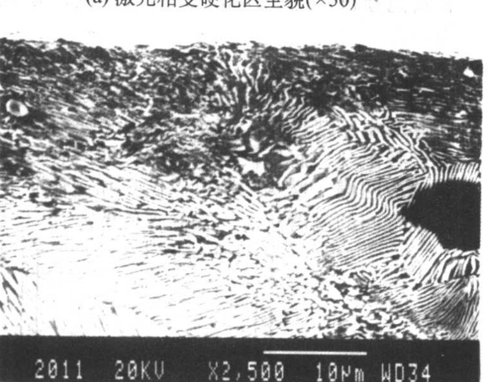
1) 显微组织 图5.1-51所示为HT250经过激光相变硬化后的组织，材料的原始组织如图d所示，主要由珠光体+石墨组成。整个硬化区从试样表面到基体分为三部分，即固态相变区、过渡区及基体。图a为相变硬化区全貌，从图中很明显可以看出为月牙形。图b为固态相变区组织，该区域由极细的马氏体+残余奥氏体+石墨组成，该区域相变硬化过程中，C原子扩散较充分，马氏体形成比例高，综合性能较好。图c为过渡区，在这个区域很明显就可以看出原始组织的痕迹十分清楚。



(a) 激光相变硬化区全貌(×50)



(b) 激光相变硬化区(×2000)



(c) 过渡区(×2500)



(d) 基体(×500)

图5.1-51 激光相变硬化区显微组织

2) 硬度分布 图5.1-52是与图5.1-51对应的沿深度方向的硬度曲线图，也是具有代表性的激光淬火铁基材料后，硬化区内硬度的分布曲线。与图5.1-51对应，曲线由三部分组成：固态相变区、过渡区及基体。*AC*段为固态相变区，*CE*段为过渡区，*E*点以后为基体。与它们的组织相对应的，*AC*段硬度比基体区硬度高，*CE*段为过渡区，马氏体含量较低，所以硬度相对固态相变区低，但是比基体组织高。另外，图中*A*、*C*两硬度低谷点的出现，其原因很多学者做了分析，在文献中指出*A*点接近表面，由于表面温度过高，发生脱碳现象，致使该处含碳量降低，硬度值反而下降；同时由于*C*点处于过渡区与相变硬化区交界处，该处在整个硬化区沿深度方向的温度分布情况为：温度值低于表层，温度梯度低于*D*点（因为*D*点更接近基体），温度低，碳原子不能充分扩散，使得残余奥氏体较多，温度梯度小，所形成



的马氏体晶粒粗大，大量的残余奥氏体和粗大晶粒的马氏体导致 *C* 处出现一硬度低谷。

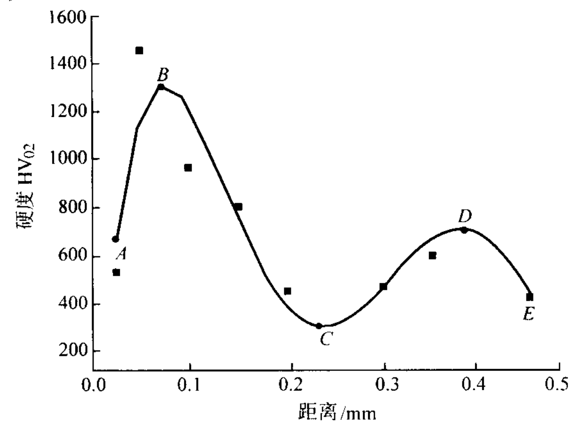


图 5.1-52　激光相变硬化处理 HT250 后沿深度方向的硬度分布曲线

4.3　激光抛光

随着材料表面技术的发展，表面抛光技术成为一个越来越重要的技术。在工业应用中，对材料表面粗糙度的要求越来越高，已经从微米级→亚微米级→纳米级→亚纳米级。为了满足应用的需要，已经有多种抛光技术被应用在工业生产中。最近几年出现了一种新型抛光技术——激光抛光技术。

4.3.1　激光抛光的机理和工艺特点

1）激光抛光的机理　激光抛光本质上就是激光与材料表面相互作用，它遵从激光与材料作用的普遍规律。根据激光与材料的作用机理，可把激光抛光简单分为两类：一类为热抛光，另一类为冷抛光。

热抛光一般用连续长波长激光，抛光时主要用 YAG 激光器和 CO_2 激光器，作用的机理是激光与材料相互作用的热效应，通过熔化、蒸发等过程来去除材料表面的成分，因此，只要材料的热物理性质好，都可用来进行抛光。Udrea 等人利用一台 10 W、功率密度为 140 W/cm^2 的单模纵流连续 CO_2 激光器，对光纤的端表面进行了抛光，使表面粗糙度从 3 μm 减少到 100 nm。但是，这些红外波段的激光在材料表面抛光过程中，由于热效应，温度梯度大，产生的热应力大，容易产生裂纹，效果不是很好，抛光达到的级别不是很高。

冷抛光一般用短脉冲短波长激光（如紫外准分子激光器或飞秒脉冲激光器）。冷抛光主要是通过“消融”作用，即光化学分解作用，作用的机理是“单光子吸收”或“多光子吸收”。材料吸收光子后，材料中的化学键被打断或者晶格结构被破坏，材料中成分被剥离。在抛光过程中，热效应可以忽略，热应力很小，不产生裂纹，不影响周围材料，材料去除量易控制，所以，特别适合精密抛光，尤其适合硬脆材料。冷抛光能完成激光热抛光不能完成的一些工作，因此，在微细抛光、硬脆性材料和高分子材料抛光等方面具有无法比拟的优越性。Folwaczny 等人利用 308 nm 的 XeCl 准分子激光对瓷器表面进行了抛光的研究，使表面粗糙度从 4.14 μm 减少到了 1.13 μm。Gloor 等人利用 193 nm 的 ArF 对金刚石薄膜进行了抛光，使表面粗糙度从 3.6 μm 减少到了 1 μm 左右。

2）激光抛光的主要工艺参数　激光抛光的主要工艺参数有激光功率密度阈值、光束质量、波长、脉冲宽度、初始条件、光束的入射方向等。抛光时，激光功率密度阈值与激光和材料的性质有关。对于激光“热抛光”，材料的热吸收系数严重影响抛光的功率密度阈值和抛光效率；对于激光“冷抛光”，材料的能级结构与激光光子能量大小严重影响抛光的功率密度阈值和抛光效率。激光光束质量对抛光的质量影响很大，在抛光时，一般采用基模激光抛光，很少用高阶模。即使是基模光束还要进行整形，使作用在材料表面的激光能量分布为均匀分布，抛光的效果就更好。对于基模高斯光束或者矩形分布光束的整形，用一种特制的玻导管可以得到比较好的均匀分布的光束。理论上各种波长激光都能够用于抛光，但是在实际应用中，为了达到高的抛光级别，一般波长越短越好。如果是采用脉冲激光，那么一般是脉宽越窄越好。对于晶体的抛光还要考虑激光光束入射方向，应沿着晶体的某一个生长方向，这样抛光的效果会更好。应注意到抛光的质量还与材料初始条件有很大的关系，对于粗抛光和精抛光，它们在工艺上的要求是有差别的，光束的扫描速度是不同的。激光抛光的效率针对不同的方式有差异，对于激光热抛光，由于是热作用，效率比较高；对于激光冷抛光，由于是光化学分解作用，效率相对要低些。根据具体的情况，在抛光时，增加一些外部条件（如辅助气体、加温、加压等），抛光效果将会更好。

4.3.2　激光抛光的应用

激光抛光能高效地排除粗糙度，但在降低波纹度方面却无能为力。这个差别可以这样解释：表面缺陷的斜度越大，其表面张力驱动物质流动的效率也越高。当用缺陷高度与缺陷长度的比值表示表面缺陷斜度时，则发现表面粗糙度的斜度值一般在 10^{-2} 范围内或者更高一些，而较大空间范围波纹度的斜度值在 10^{-4} 范围内。因此在目前的实验条件下，以条形激光束扫描试样表面，激光辐照期间表面张力很小，不足以减小波纹度。采用增加积累在试样表面上能量的办法来增加驱动物质流动的表面张力，又会造成表面形状的微观变形。

1）激光抛光玻璃和玻璃－陶瓷表面的机理与方法　在制造具有玻璃、陶瓷或者玻璃－陶瓷表面的工件时，人们常常要求精加工工件的这些表面以调整其表面粗糙度。传统上讲，常常使用化学的、机械的、热的加工方法来修正玻璃表面、陶瓷表面或玻璃－陶瓷表面的粗糙度。

在欧洲专利 0535620，Jaschek 发明了一种用于抛光玻璃表面的方法，其将表面接受点作用能量源，比如 CO_2 激光的辐照。激光部分熔化玻璃表面，但是同其他热抛光技术相比，该抛光方法中，玻璃表面的熔化区域被限制在非常薄的表面层。这样一来就可以保护基体材料的形状、结构以及角度，只是细微地圆化了基体材料上尖锐的棱边。进一步讲，CO_2 处理后的表面会沉积一层增透膜，这比机械抛光的表面沉积一层增透膜后有更高的抵抗激光损伤阈值。根据有关损伤测试表明，一些 CO_2 处理后的表面与激光处理后的的表面具有与 SiO2 体损伤阈值同样高的局部损伤阈值。在一些 CO_2 激光处理后的表面，大光斑损伤阈值是原机械抛光表面损伤阈值的 3～4 倍。

用热抛光玻璃表面有几个不利方面。首先，该种工艺方法仅限于抛光玻璃材料。该工艺方法不适合抛光陶瓷材料，因为在温度达到足以熔化材料使其发生流动的情况下，陶瓷的晶体结构将会发生显著破坏。该方法对抛光玻璃－陶瓷表面的价值也有限，因为在该方法中材料表面必要的熔化允许玻璃基发生流动，从而破坏了埋植在玻璃基中的陶瓷颗粒的晶格方向和结构。这些变化反过来影响到玻璃－陶瓷的杨氏模量、硬度、化学和物理性质的稳定性以及其他宏观性质。其次，在冷却过程中，材料表面常常会产生细小的裂纹，这就削弱了材料表面性能，同时促使材料宏观断裂发生。虽然提高温度可以减低在玻璃材料表面因使用热抛光引起的裂纹形成，但玻璃的强度仍然受到热抛光的影响。另外抛光玻璃、陶瓷、玻璃－陶瓷的方法，首先研磨材料表面到接近于

净厚度，接着再抛光到所须的最终表面厚度和表面光洁度。由于在研磨过程中使用了粗糙的研磨颗粒，这些颗粒会形成中介物质，从而严重破坏到材料的次表层，抛光的目的正是要去除这层受到破坏的材料。因此对此而言抛光通过物理的、化学的同材料相互作用研磨材料表面使其达到所要求的表面光洁度。传统的用于抛光的化合物是研磨料，其大部分情况下是由铈粒或氧化铝颗粒弥散分布于水溶剂中制成。涂有涂层材料的薄片加以一定的压力作用在待抛光的材料上，同时在材料的表面滴研磨液以保证研磨液能够导入到材料和薄片之间，这样就可以实现对材料的抛光。抛光研磨液可以提高抛光效率，但也会污染环境且使用不方便。此外，该工艺要求频繁补充研磨液，同时也会产生研磨废料，这就限制了该工艺方法在高生产率工艺流程中的使用。

2）化学气相沉积（CVD）金刚石膜的抛光技术　化学气相沉积（CVD）金刚石为多晶材料，其表面为杂乱分布的晶粒的堆积，生长的金刚石膜有着不规则的厚度，而且表面粗糙度和不规则的厚度情况随着膜厚的增加而增加，尤其是金刚石厚膜，其表面堆积的大晶粒显露出明显的棱角。这些给金刚石厚膜刀具的使用带来了限制。为了克服这些问题，必须对金刚石膜进行抛光和光整加工来减小表面粗糙度，使其达到实用所需的要求。

表 5.1-18　各种金刚石抛光技术的比较

名称	温度	机理	形状限制	尺寸限制	特殊要求	设备费用	抛光费用	抛光效率	粗糙度/nm	表面污染
机械研磨	室温	微切削	平面	无	无	低	低	低	210	有
热化学抛光	800～900℃	石墨化扩散	平面	抛光片大小	有	低	低	较高	5.5	有
CAMP	＞350℃	氧化	平面	抛光片大小	有	低	低	较高	4.9	有
激光抛光	室温	刻蚀蒸发	非平面	无	有	高	高	高	500	有
离子抛光	室温	喷射刻蚀	非平面	粒子束尺寸	有	高	高	较高	5	有
电蚀抛光	室温	石墨化	无	无	有	高	高	高		有

激光抛光金刚石膜的机理主要包括金刚石膜的瞬时热氧化、蒸发、消融和石墨化等。如果给金刚石表面提供充足的能量时，表面突出部分的金刚石膜能够蒸发，产生比较光滑的表面。

下面介绍一种金刚石厚膜激光抛光法，样品由电子辅助热丝化学气相沉积法（EACVD）得到。表 5.1-18 是由螺旋测微仪测出的金刚石膜各部位的厚度，膜厚是随着离膜中心距离的增加而增加的。沉积的膜实际上呈中间低、四周高的圆盘状。

表 5.1-19 是由粗糙度仪测得的 R_a、R_z 和 R_{max} 值。由于激光扫描的金刚石膜的区域为 4×4 mm，所以采样长度均为 1.75 mm 以利比较。但在 L_t＝5.6 mm 的情况下应该更能反应实际情况。

表 5.1-19　金刚石膜的表面粗糙度

距圆心距离/mm	0	10	20	20	30
厚度/mm	0.57	0.6	0.62	0.62	0.66
L_t/mm	1.75	1.75	1.75	5.6	1.75
R_a/μm	3.167	4.151	4.312	6.241	4.523
R_z/μm	14.1	21.6	22.4	37	22.7
R_{max}/μm	20.7	27.3	29.9	51.2	28.4

实验所用的主要的激光工艺参数如表 5.1-20。在激光抛光过程中，主要考察激光功率、入射角度和扫描次数等因素对抛光表面粗糙度的影响。

表 5.1-20　激光抛光金刚石膜的主要工艺参数

波长 λ	脉宽 τ	光斑直径 d	重复频率 f	扫描速度 v	扫描步距 b	抛光面积
1.06 μm	400 ns	0.1 mm	25 Hz	0.6 m/s	0.05 mm	0.4 mm×0.4 mm

图 5.1-53 中左面是未经激光照射的表面，从中可以看到晶粒比较完整，而在右边可以清楚地看到突起的峰被打掉的情况。激光照射表面只能作为粗加工来一定量地降低表面粗糙度，而不能实现精加工。

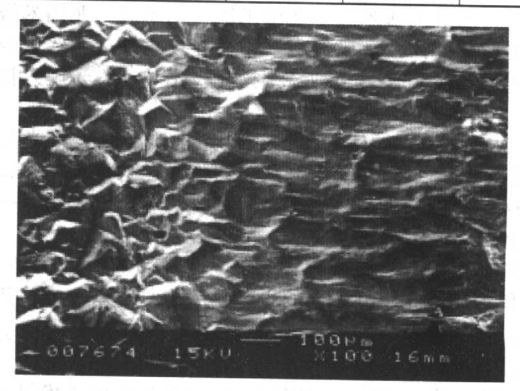


图 5.1-53　激光照射表面和未照射表面对比

经过激光处理以后的膜的拉曼光谱，非常明显地发现在 1 350 cm^{-1} 和 1 580 cm^{-1} 的波数有两个突起的石墨峰。说明经过激光热加工以后，表面附着石墨成分，因为激光加热使金刚石发生了石墨化，这层石墨成分很容易被除去。如果采用准分子激光扫描金刚石膜，将没有石墨成分的产生，因为准分子激光的加工原理是激光冷加工，直接破坏 C－C 结合键而不产生石墨。

影响其抛光效果的主要因素有：入射角、平均功率以及扫描方式，抛光金刚石膜的气体氛围也对抛光效果产生影响。

金刚石膜抛光的主要目的在于削平表面突起的峰，但金刚石膜的抛光实际上是对金刚石膜表面扫描的过程，是由各个脉冲作用于金刚石膜表面效果的叠加。当入射光线沿法线方向入射到金刚石表面时，每个脉冲作用的效果实际上是在钻孔。脉冲垂直打到金刚石膜表面的时候，当脉冲落到突起的峰尖时，峰尖会被削平，当脉冲落在波谷时，脉冲会加深波谷的深度，特别当脉冲落到晶粒与晶粒之间的时候，反而会加剧峰谷之间的起伏。但是一般抛光的时候，将激光聚焦于膜的上表面，由于激光的发散特性，峰尖处的接触光斑小而能量密度较大，波谷处的接触光斑面积增大而能量密度较小，且峰尖的部位受加热部分的体积小而加热充分，在波谷位置，受加热的体积增大而升温较峰尖慢，所以金刚石表面的微观形貌决定了温度的不均匀分布，使得峰尖温度高而波谷的温度较低。温度高的尖峰首先转变为石墨，石墨比金刚

石更容易吸收热量。这样，在峰尖的部位比波谷更容易蒸发和溅射，使得在峰尖位置的去除量较大，而波谷位置的去除量较小，从而一定程度上导致金刚石膜粗糙度的减小。

功率过大或过小均不利于减小粗糙度。平均功率对粗糙度的影响主要通过材料的去除量来影响。当激光功率过小，不能去除金刚石膜材料，或者只能去除少量的金刚石膜材料，不能充分削平突起的尖峰。当激光功率过大的时候，去除量极大，会在金刚石膜表面引起很深的凹坑，也不能很好地达到减小表面粗糙度的目的。平均功率对表面粗糙度的影响是与其他工艺因素如扫描速度或扫描步距等因素相关联的，这些因素可以决定金刚石膜受到脉冲冲击的密度。

然而使用激光抛光金刚石膜也有限制。由于晶体结构中晶界和晶面的化学性质不同，使得在同样的激光照射下会有不同的蒸发率，并且石墨成分比金刚石成分更容易被蒸发，所以，激光抛光获得相对比较粗糙的表面。这项技术非常适于大面积的粗加工，加工效率很高。抛光时间取决于金刚石样品的尺寸、光柱的尺寸和激光器的扫描能力。

4.3.3　激光抛光技术的应用前景

近年来，日本、德国、美国、俄罗斯、韩国等许多国家都在积极开展激光抛光技术的研究。激光抛光特别是在下面几个方面的应用前景诱人。首先，在强激光武器系统中晶体输出窗口（透过率要求达 99% 以上）和全反镜（反射率要求达 99% 以上）的抛光。激光输出窗口是石英、金刚石或类金刚石材料、白宝石材料等；全反镜通常采用硅反射镜，SiC、Al_2O_3 或 AlN 也被认为是很好的全反镜材料。这些材料共同点是硬度较高，镜面加工比较困难。传统的机械抛光加工过程是抛光→拆卸→清洗→面形测量→装夹→再抛光……循环往复，直至光洁度达到要求为止。这一过程非常费时，如一块白宝石窗口所需加工时间就长达数月，探索新的抛光技术非常必要。因此，对这些硬脆材料的激光抛光研究，将会极大地推动强激光武器的发展。

另外，在激光核聚变中大量使用大尺寸高精度的光学镜片元件。这些大尺寸的光学元件，都要求以 $\lambda/6$ 以下的波前相差制作，供装置使用。这些光学玻璃几乎都采用机械研磨工艺制作，而研磨工艺及波前检查、校正都很花费时间并要求熟练的操作，需要长制作周期和高成本。如果激光抛光技术得到发展，就能够加工出更好的微光学元件，将会促进光纤通信的发展，从而产生巨大的经济效益。

激光抛光技术作为一项新技术，具有很多优点，但设备的成本高，抛光的费用比较贵，这在一定程度上限制了该技术的发展。另外，如果利用激光对超硬材料表面进行抛光时，由于材料的剥离量小，效率就比较低，此时，一般是综合使用多种抛光方法。

4.4　激光冲击强化

激光冲击是利用高峰值功率短脉冲激光与物质相互作用，产生强冲击波，并利用冲击波来开发各种用途的技术。激光冲击一般采用钕玻璃、红宝石及 YAG 高功率激光装置，激光脉冲的宽度为纳秒量级（10^{-9}s），激光功率密度一般大于 10^9 W/cm^2。激光冲击会产生高温高压等离子体，瞬时温度可达 100 000℃，压力高达数千兆帕，甚至可高达 15 TPa。但是激光冲击应用主要是利用其高压力学效应，而激光冲击的时间极短，工件几乎没有受到热影响，其表面温度仅在150℃左右，故热学效应可以忽略不计，并可将激光冲击强化工艺归为冷加工工艺。利用冲击波对材料表面进行改性，以提高材料的抗疲劳、磨损和应力腐蚀等性能，是当今国内外相关学者研究的热点和前沿，这就是目前得到公认的激光冲击强化 Laser Shock Processing，或 Laser Shock Peening，简称 LSP 技术。

与一般用于材料改性处理的经典方法如锻打、喷丸硬化、冷挤压、激光热处理等相比，激光冲击处理具有非接触、无热影响区及强化效果显著等突出优点。为此，人们对激光冲击强化机理，冲击波在介质中的传播和衰减，及约束层、涂层技术进行了大量的研究，并对航空钛合金、铝合金和汽车发动机零部件材料如 45 钢、QT700 - 2 等材料实施了激光冲击处理，获得试样的疲劳寿命有较大幅度的提高。

4.4.1　国内外研究发展状况

1972 年，美国 Battell's Columbus 实验室的 Fairand B.P. 等人首次用高功率脉冲激光诱导的冲击波来改变 7075 铝合金的显微结构组织和力学性能，研究表明 7075 铝合金材料经激光冲击后，其屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 提高 30%。1974 年，对特定条件下激光冲击产生的冲击波进行了实验测试研究，1978 年，他们又在美国空军飞行动力实验室（AFFDL）的资助下，相继开展了激光冲击处理以提高铁基合金及航空铝合金疲劳性能的研究，7475T73 经激光冲击后疲劳寿命提高一倍，Fe - Si 合金（Si3%）经激光冲击得到 0.2 mm 厚的均匀硬化层，硬度提高 25%。

1979 年，美国国防工业著名的洛克希德 - 乔治亚公司（Lockheed - Georgia Company Marietla，Georgia 30063）的 William F. Bates 也开展了激光冲击处理 7075T6 和 7475T73 铝合金的研究。

1983 年，以色列 Eliezer S. 和 Salzman D. 等人开展了激光冲击处理的理论分析研究，1987 年他们又开展了激光冲击处理复合材料的研究。

1987 年以来，Fabbro R. 等人在法国汽车与航空工业基金资助下，在 LALP 实验室进行了激光冲击处理技术的系统研究，内容涉及激光与材料作用产生冲击波的机理及理论模型、激光冲击后材料性能的改变等，并提出了激光冲击波的分析模型。

1989 ~ 1993 期间，俄罗斯学者开展了激光冲击蓝宝石和陶瓷、石墨合成金刚石相、P - N 结等的研究。

1990 年，法国学者 Banas 对 18Ni 合金钢进行了激光冲击处理研究，使其疲劳寿命提高了 17%。Gerland 等人对 316 不锈钢进行激光冲击处理后获得了与爆炸冲击表面相似的组织结构。1994 年，巴黎 P. M. Fout 材料研究中心的 Dubrujeaud B. 等开展了激光冲击以提高疏松材料密度的研究，粉末冶金零件表面密度及硬度提高了，从而有效地改善了零件的耐磨损性能。

1995 年 2 月，Jeff Dulaney 博士创立了世界上第一家激光冲击处理技术公司（LSP Technologies Inc.），建立了激光处理网站，注册了 LSP 商标，利用其先进的激光冲击处理设备和系统，向工业界提供激光冲击处理技术及加工服务。另外，美国加州大学的劳伦斯里弗莫尔国家重点实验室（LLNL）与金属改性公司（MIC）合作，开发出了峰值功率 3GW、重复频率 10 Hz 的钕玻璃激光器系统，用于涡轮发动机叶片的激光冲击处理，并申请了发明专利。

1999 年，William Braisted 对激光冲击强化进行了有限元模拟，用于预测激光冲击后在材料表面产生的残余压应力的大小及分布。随后，Nikiforov 利用冲击波作为改变材料应变率的工具，控制复合材料基体和界面的结构等。

从上述的各种研究看，激光冲击波技术已被作为一种有效的加载工具，广泛用于各种领域的应用研究和机理研究。

我国对激光冲击波技术的应用研究起步较晚但发展迅速，主要是国内大功率激光装置于 20 世纪 80 年代后期才进入实用阶段，且数量极少。

4.4.2　激光冲击物理基础

激光与物质的相互作用机制比较复杂，主要包括光电离吸收、多光子吸收、空穴吸收以及杂质吸收等多种类型。

随着激光强度的不一样，发生相互作用的机理可能截然不同，激光与物质的相互作用现象也不一样。一般说来，在不同数量级的激光功率密度下材料表面发生的现象如表 5.1-21 所示。

表 5.1-21　不同激光功率密度下材料表面发生的现象

功率密度/W·cm^{-2}	10^3 ~ 10^4	10^4 ~ 10^6	10^6 ~ 10^8	10^9 ~ 10^{10}
材料表面发生的现象	加热	熔化	气化	等离子体

由上表可以看出，在不同的功率密度范围内，激光与物质的相互作用有不同的物理过程。功率密度小于 10^6 W/cm^2 的长脉冲激光的热效应主要表现为熔融；当激光功率密度大于 10^6 W/cm^2，脉冲持续时间大于 100 μs 时，激光与材料的相互作用基本上是气化过程；当超过 10^9 W/cm^2 时，则会出现激光等离子现象。

1）激光冲击的物理过程　激光冲击强化是利用高功率密度（10^9 W/cm^2 量级）、短脉冲（纳秒级）强激光冲击金属表面，产生向金属内部传播的强冲击波，当冲击波的峰值压力大于材料的动态屈服强度时，使金属材料表层发生塑性变形，形成激光冲击强化区，从而改善金属材料的机械性能。其原理如图 5.1-54 所示。为了提高对激光能量的吸收及保护金属材料表面不受到热损伤，在激光冲击强化前，需在工件待冲击区表面涂一层不透光的材料，称之为涂层。然后再覆盖一层对激光透明的材料，称之为约束层。激光通过透明层后，激光能量被不透光的涂层吸收，部分涂层蒸发，形成蒸气，并被限制在涂层和约束层之间。蒸气和涂层继续吸收激光能量，温度急剧升高，气化、形成等离子体而爆炸，形成向金属内部传播的压缩冲击波。

按时间顺序可将上述过程分成四个阶段：①激光的吸收及能量的传输；②材料在激光冲击下的低温传热阶段；③气化阶段；④蒸气强烈吸收激光能量，发生爆炸，形成等离子体与冲击波。

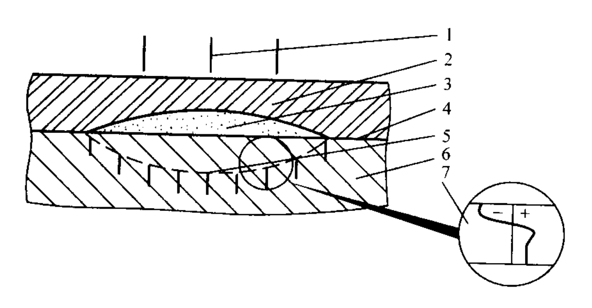


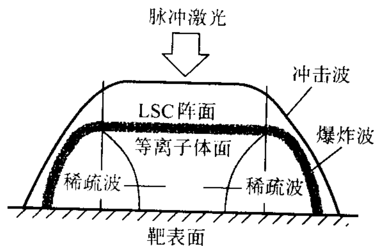
图 5.1-54　激光冲击强化原理

1—激光脉冲束；2—约束层；3—产生气化形成高压；4—涂层；5—传向工件的冲击波；6—工件；7—残余应力分布

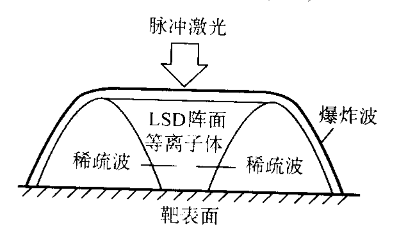
2）激光冲击产生冲击波　以开始气化这一瞬间起，向内层热扩散不再起作用。此后，仅是表层气化过程不断地向内层迁移。由于约束层的作用，金属蒸气被限制在工件表面，继续吸收激光辐射的能量后，产生爆炸与电离，体积急剧膨胀，形成由激光束能量支持的爆轰波（强冲击波），约束层被击穿。

产生激光冲击波的物理机制一般认为有两种。一是热冲击，它起源于靶体表面快速地吸收激光脉冲能量所造成的热膨胀和巨大的应力梯度；另一类是机械冲击，它起源于迅速蒸发与膨胀的高温等离子体蒸气对靶体的反冲压力。在激光冲击成形中，所采用的激光功率密度为 10^9 W/cm^{2}ns 量级，脉宽为纳秒量级，靶体表面产生等离子体近乎是瞬间的，因此反冲机制起主导作用。此时入射激光被靶蒸气吸收，产生以热传导或流体动力学机制传播的激光吸收波 - 激光维持的燃烧波（LSC）和爆轰波（LSD）。

在较强短脉冲激光作用下，常常发现辐照仅几十纳秒后即有激光吸收区形成，显然这时靶材气化尚未发生。此吸收区是环境气体发生光学击穿或电离形成的，通常对应于爆轰波的形成。材料蒸气完全成为等离子体后，激光与物质相互作用反映在激光与等离子体中静电波及离子声波的各种耦合散射现象。温度还不十分高的等离子体对激光部分透明，通过自调整体机制维持近于不变的光学厚度。温度很高的等离子体对激光又变成透明，入射激光直接作用于发生共振吸收等反常机制的临界密度面，形成以极高速度和压力向靶材内部传播的激光支持的爆轰波，这是激光等离子体冲击波产生的根源。激光功率密度越大，脉冲能量越高，所形成的爆轰波越强。



(a) 激光维持的燃烧波 (LSC)



(b) 激光维持的爆轰波 (LSD)

图 5.1-55　LSC 和 LSD 波结构示意图

4.4.3　激光冲击的理论模型

R. Fabbro 对约束模型下的冲击波进行了理论研究，作如下假设：

1）激光能量均匀分布，整个光斑范围内，材料表面受热均匀；

2）约束层和靶材皆为各向同性的均匀物质，热物理特性为常数；

3）把等离子体看作理想气体；

4）等离子体只在轴向膨胀。

如图 5.1-56 所示，激光能量在靶材 1 和约束层 2 之间被吸收，并仅仅局限在一很薄的表层，这一区域的物质（即涂层）被加热、气化。离化后形成等离子体，它的爆炸受到了约束层的限制，压力迅速增大，同时打开界面做功。

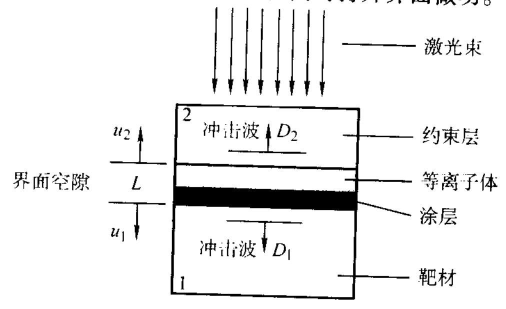


图 5.1-56　冲击波与介质作用示意图

假设这一压力足够强以致产生两冲击波分别在靶材和约束介质中反向传播，界面的位移仅仅由两冲击波后的流体运动引起。以 $L(t)$ 表示在 t 时刻界面空隙的厚度，则可由如下公式计算：



$$L(t) = \int_0^t [u_1(t) + u_2(t)] \mathrm{d}t \qquad (5.1\text{-}38)$$

式中，冲击波后方的两流体速度 u_1 和 u_2 可由如下冲击波关系给出：

$$P = \rho_i D_i u_i = Z_i u_i \quad (i = 1,\ 2) \qquad (5.1\text{-}39)$$

式中，ρ 为密度；D 为冲击波速度；Z 为冲击波阻抗系数。

根据能量守衡和能量转化定律推算出冲击波的压力公式如下：

$$P\ (t)\ = 0.01\ \left(\frac{\alpha}{2\alpha + 3}\right)^{\frac{1}{2}} Z^{\frac{1}{2}} I_0^{\frac{1}{2}} \qquad (5.1\text{-}40)$$

式中，P，GPa；Z，g/（cm^2·s）；I_0，GW/cm^2。

因为入射激光的脉宽 τ 很小，可以近似为 $\tau = \mathrm{d}t$，将 $\tau = \mathrm{d}t$ 代入式（5.1-38）和式（5.1-39）得：

$$\frac{L\ (\tau)}{\tau} = \frac{2P}{Z}$$

$$L\ (\tau)\ = 2P\tau Z^{-1} \qquad (5.1\text{-}41)$$

式（5.1-41）非常有用，它定量地反映了约束层声阻抗及激光功率密度对冲击波压力的贡献。从式中可以看出 P 与 $I_0^{0.5}$ 成正比关系，提高功率密度可以提高冲击波的峰压。但最近国外研究表明：当激光功率密度 I_0 超过某一阈值时，冲击波峰压 P 并不随着 I_0 的增加而增加，反而会有些下降。这主要是由于约束层吸收激光后产生的等离子体对激光的屏蔽效应所引起的。

法国 Fabbro 等人在推导上述模型时，考虑到激光能量的损失并认为激光能量的损失机制主要有：①材料变形后所储存的变形能；②由于热传导所损失的辐射能；③用于气体膨胀的激光能量。后两种损失对结果的影响很大。

缺点是：①系数 α 跟涂层的性质有关，还跟激光脉冲性质如脉冲形状、脉冲宽度有关；②处于千兆帕量级高压下的等离子体，理想气体将不再是很好的近似，其效果相当于 α 减小，计算值也将变小；③没有考虑冲击波的衰减；④没有考虑到等离子体的横向膨胀效应。

4.4.4 激光冲击强化中的涂层和约束层技术

由上述分析可知，当高功率（GW/cm^2）、短脉冲（纳秒量级）的激光束辐照在金属表面时，表面层产生烧蚀气化，形成高温高压的等离子体，从而诱导一个向金属内部传播的冲击波，这种现象称为直接烧蚀模式。为了保护金属靶材表面免受激光的热损伤，在激光冲击处理中，往往先在靶材表面涂敷一黑色的涂层。在吸收激光能量后气化，形成等离子体，再在黑色涂层上面覆盖一透明约束层，以对膨胀的等离子体起到约束作用。这样就大大提高了冲击波峰值压力，并延展了压力的作用时间。

（1）能量吸收涂层

1）涂层的作用　理想的金属表面对激光的反射率是很高的，表面加覆涂层后，涂层将取代金属表层，几乎吸收全部能量，更容易产生更多的等离子体，从而诱发了压力更大、持续时间更长的激光冲击波。

另外，在表面加覆涂层后，被加热、气化的是涂层，靶几乎与热量隔绝，这样起到了保护作用。实验表明在没有黑漆涂层的试件表面会出现十分明显的烧蚀熔化和重结晶痕迹，而有黑漆涂层的试件表面基本没有损伤。

2）涂层对冲击波压力的影响　由于冲击波的形成总需要一定的过程，根据 Cottet F. 等从理论和数值分析研究中得出的结论，冲击波的峰值压力一般在距离靶面 40 μm 左右达到最大。李志勇等采用 40 μm 厚的铝膜作为靶材，用激光光斑直径为 7 mm，能量 6 J 的脉冲激光进行冲击，利用 PVDF 压电传感器测量了有无黑漆涂层时，脉冲激光诱导的冲击波在靶材中的演化。实验结果如图 5.1-57 和图 5.1-58 所示。

图 5.1-57 为没有表面涂层时，激光脉冲波形及其相应的

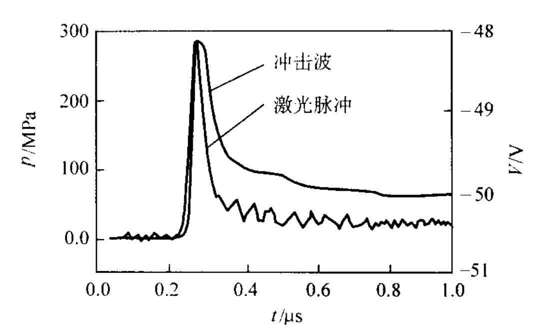


图 5.1-57　无表面涂层时激光脉冲波形及其诱导的冲击波波形

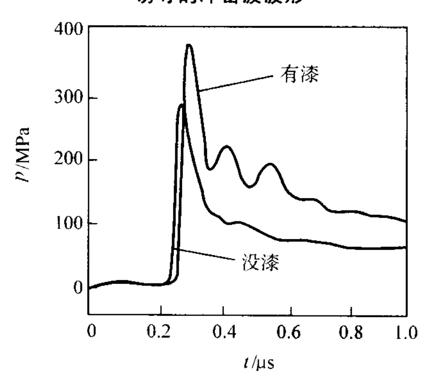


图 5.1-58　黑漆涂层对 0.04 mm 铝靶中激光诱导冲击波的影响

冲击波波形。图 5.1-58 为黑漆涂层对铝靶中激光冲击波的影响，从中可以看出，黑漆涂层不仅能增加激光冲击波的峰值压力，而且对冲击波的演化过程也有较大的影响。分析认为黑漆涂层增压的主要原因是由于黑漆较金属靶材具有较低的气化热，在激光冲击下更易气化爆炸。黑漆涂层对冲击波的演化过程也有较大的影响是由于激光产生等离子体的动力学复杂性和不确定性造成的。因为黑漆涂层材料的物质结构相对于铝的复杂性，由其产生的等离子体层的离化程度和深度有更大的波动性，引起等离子体体系的基本物理量的更加不确定，从而导致激光冲击波的演化过程中特征参数的更大起伏。

3）能量吸收涂层的选择原则　表面涂层是激光冲击强化中诱导冲击波形成的物质基础，对冲击效果起着至关重要的作用，因此涂层的材料、厚度和涂覆工艺选择非常重要，通常应满足以下一些要求。

① 涂层材料　涂层材料应满足：a）对激光的吸收率较高，易于提高冲击波峰值压力；b）具有低的热传导系数和低气化热，这样可以增加自身吸热并减小对靶材的热传导，提高应力波的幅值和脉宽，减小靶材的热损伤；c）能经受高的功率密度和温度，有机化合物不能采用；d）易于涂敷至金属表层且与基体金属相容，易于去除。

目前在激光冲击板料变形过程中常用的表面涂层材料为黑漆，这种涂料一般在实验完成后极易从试件表面除去，然而涂层的工艺规范和成分配置仍处于摸索阶段。

② 涂层厚度　在激光冲击板料变形中，由于表面涂层吸收激光能量后气化形成等离子，因此其厚度的控制很重要。涂层太薄，激光能量可透过吸收层而直接烧蚀金属材料；涂层太厚，会对激光冲击波形成衰减，导致传到靶材的能量损失，降低激光冲击效果。因此，选取涂层时，涂层厚度从理论上讲应大于等于气化层的厚度。根据前面的分析，在假定涂层材料在高能激光冲击下瞬间气化，忽略液相存在的前提下，可以用式 $\xi = \dfrac{AI_0\tau}{\rho\ [L + c\ (T_b - T_0)]}$ 估算最小涂层

厚度 ξ，实验中一般取 30~100 μm。

(2) 约束层

1) 约束层的作用　在激光冲击强化的研究中，人们对约束层的机理及适用的材料进行了较为深入的研究。早在1973年，O'keefe J.D. 就对两种不同的靶面进行了研究，一种情况是直接照射在靶面上，另一种是在靶前加一透明玻璃约束层。实验表明，在后一种情况下，冲击波幅值要增加一个数量级，而且冲击波半高宽度也大大加宽。目前常用的约束层是固体玻璃和水两种。

采用水作为约束层时，不仅能增大冲击波峰压，而且还能使其脉宽变宽。

在有约束层的情况下，等离子体被限制在约束层和金属靶材之间。随着涂层对激光能量的吸收，被约束的等离子体密度增加，温度升高加快，等离子体的逆韧制吸收效应增强，激光能量被成倍吸收，施加于靶体的反冲压力变得更大。

2) 约束层的选用　根据理论分析和实验结果，在实际应用中可以根据以下原则选择约束层。

① 约束层材料的选择　在激光冲击处理过程中，由于激光要透过约束层沉积在能量吸收层上，因此对约束层的要求是：a) 对特定波长的激光具有很高的透光率；b) 冲击波阻抗高的约束层材料，因为对特定的金属材料，约束层的冲击波阻抗越大，冲击波峰压也就越大；c) 约束层材料应具有足够高的机械强度，其拉伸强度和剪切强度应尽可能大，这是因为约束层的机械性能对激光冲击变形效果有很大的影响，约束层的刚性越好，冲击强化效果越好；d) 装夹方便，适合于工程应用场合；e) 同时应避免约束层表面的污垢，如油脂、汗迹等，这是因为它们会吸收激光的能量。

② 约束层厚度的选择　由于下列原因，在激光冲击金属板料变形时应选择一定厚度的约束层。a) 当传入约束层中的冲击波引起的拉应力超过约束介质的抗拉强度时，会引起约束层的碎裂，在实验过程中约束介质（一般为玻璃）会沿靶材表面法线向外飞溅，飞溅颗粒速度较快，给操作人员的安全、周围器件诸如聚焦透镜等带来不利影响，因此为了防止约束层材料在激光作用期间过早地发生层裂破坏，必须选择一定厚度的约束层；b) 冲击波传播到自由表面需要一定的时间，一定厚度的约束层可有限延缓层裂的时间，这对增加冲击波峰压的持续时间十分有利；c) 通过上述的实验分析，在激光冲击金属板料变形中，随着约束层厚度的增加，靶材的变形量增大。

根据以上原因，可以选用较厚的约束层，但是过厚的约束层会增大对激光的吸收和散射，导致激光能量的利用率降低，同时也使激光冲击变形的成本增加。另外，在高压冲击波作用之下，当冲击波峰压超过了约束介质的压缩屈服值时，约束介质的内表面会发生碎裂，虽不会造成约束层的完全破裂而四溅，但阻止了激光能量的通过，限制了冲击波峰压力增大。为此必须选择合适的约束层厚度，在降低冲击成本，充分利用激光能量的同时，又能保证冲击变形效果。目前，约束层厚度的估算还没有理论公式，因此在利用激光能量来实现动高压加载的实际应用中，需在实验中对约束层的厚度进行优化。

4.4.5 激光冲击强化效果的理论研究

激光诱导的应力波与金属材料相互作用的效果主要依赖于在金属靶面上是否有涂层（能量吸收层）。如果没有吸收涂层，则由激光能量产生的热影响占主导地位，金属表面的加热区域，会因热膨胀而受到周围材料的塑性压缩，但在冷却后就会产生拉应力和拉伸塑性变形。

在金属靶材表面覆盖能量吸收涂层，则升华和热影响仅发生在能量吸收层内，在金属靶内仅产生一纯粹的机械效果。其残余应力的产生分成两个阶段，如图 5.1-59 所示。①在激光照射时间内，由等离子体的迅速喷射沿冲击波的传播方向上产生一纯粹的单轴应力，而在平行于材料表面的平面内产生一拉应力（图 5.1-19a）；②受激光冲击区域的体积发生塑性应变，但因受周围金属材料的限制，在平行于冲击表面的平面里产生双轴压应力场（图 5.1-59b）。

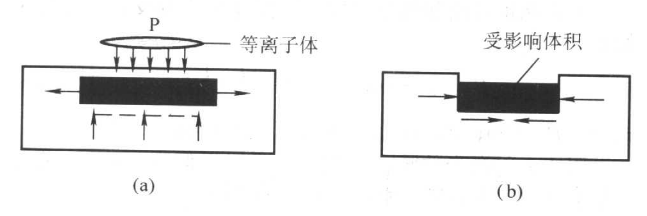


图 5.1-59　激光冲击诱导残余压力

为便于计算材料表面的残余应力，假设①塑性变形体积为嵌入一半无限大的理想弹性物质中的平行六面体，如图 5.1-60，冲击区域为一个正方形（边长为 a）；②残余应力场是双轴的和各向同性的。则得到如下的表面残余应力计算式：

$$\sigma_{surf} = \mu\varepsilon_P\left(\frac{1+v}{1-v}\right)\left(1-\frac{4\sqrt{2}}{\pi}(1+v)\frac{L_P}{a}\right) = -Ys\left(1-\frac{4\sqrt{2}}{\pi}(1+v)\frac{L_P}{a}\right) \tag{5.1-42}$$

图 5.1-60　残余应力计算模型

若金属靶材存在初始残余应力 σ_0，则 Hugoniot 极限应进行修正。这样材料经激光冲击后的残余应力场分布为：

$$\sigma_{surf} = \sigma_0 - (Ys+\sigma_0)\left(1-\frac{4\sqrt{2}}{\pi}(1+v)\frac{L_P}{a}\right) = \sigma_0 + \mu\varepsilon_P\left(\frac{1+v}{1-v}\right)\left(1-\frac{4\sqrt{2}}{\pi}(1+v)\frac{L_P}{a}\right) \tag{5.1-43}$$

4.4.6 典型材料激光冲击强化效果

激光冲击产生高幅度应力波，使材料发生弹性塑性变形，并在金属表层形成密集的位错、空位及空位团。这些效应能改变激光冲击金属的显微结构和力学性能。如果激光冲击能量进一步提高，就可以使金属表面发生熔化，并形成月牙凹坑。如果熔化出现，随即发生的超快凝固能产生金属玻璃、超细晶粒结构、亚稳相和大量的空位集中。

激光冲击强化应避免上述不利因素的出现。激光冲击强化能够增加试件的表面硬度，由于激光冲击是局部化的，可控制的，快速的，处理区不会产生明显的宏观变形。材料硬化的情况与激光冲击参数、冲击方式及激光冲击诱导的应力波等因素有关。

激光冲击参数是指脉冲能量、功率密度、脉冲宽度、冲及光斑面积及波长，这五个因素中有四个独立变量。随着激光功率密度的增加（即能量密度的增加），所产生的冲击波峰压越高，则冲击区的表面硬度越高。

球墨铸铁经激光冲击后，其表面组织及性能得到较大改善。表面变形的深度、强化层深度和冲击区硬度均随冲击次数的增加而增加。与未冲击区相比，试件经 1~4 次激光冲

B4

击后，冲击区表面平均硬度分别增加了约34.56%，45.04%，45.1%~23%和53.02%，且能在冲击区表面产生残余压应力，从而能提高材料的疲劳性能，因此激光冲击在汽车、机械、航空航天等领域具有广阔的应用前景。

45调质钢激光冲击强化区的表面显微硬度分布明显高于基体，激光参数：能量15 J，脉宽30 ns，光斑直径ϕ6 mm，涂层厚度40 μm，K9玻璃作为约束层，用维氏硬度计测量其显微硬度，基体平均硬度为313 HV，冲击区硬度范围为376~488 HV，平均值为413 HV，提高了32%左右。从试件表面到心部，硬度逐渐呈下降趋势。在据表面大约30~40 μm处硬度值最大，约462 HV，比心部硬度高50%左右，在离试件表面大约100 μm处硬度变化趋于平稳。在95%的置信度下，激光冲击强化处理试件的中值疲劳寿命是未冲击试件中值疲劳寿命的5~13倍。

激光冲击处理2024T62铝合金的显微硬度分布如图5.1-61所示。激光冲击参数：能量27.5 J，脉宽30 ns，光斑ϕ10 mm，激光功率密度1.12 GW/cm^2，估算的作用在试件表面的冲击波峰压值为1.8 GPa，已大于铝合金的动态屈服强度（0.52 GPa），故能产生较大的塑性变形。采用71型显微硬度计进行显微硬度测量，负荷50 g，保压时间15 s。试件表面稍作抛光处理。由图5.1-61可知，冲击区的显微硬度有较大幅度的提高。由于激光光斑中能量分布不均匀性等因素，造成冲击区显微硬度的不均匀性。基体的显微硬度72~93 HV，冲击区显微硬度98~137 HV，硬度平均提高42%。总体而言，冲击区中心的显微硬度较冲击区边缘的显微硬度值高。

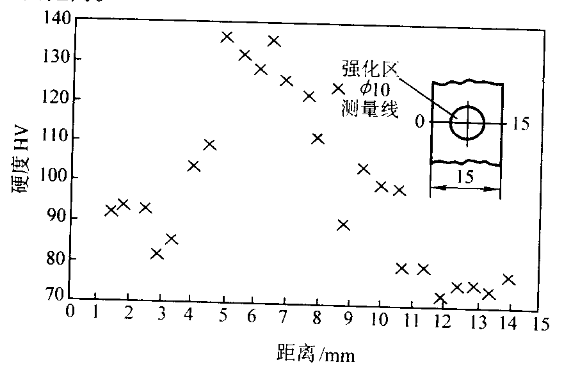


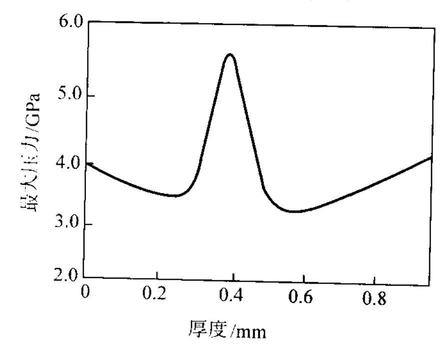
图5.1-61　2024－T62激光冲击区表面显微硬度

激光冲击试件的疲劳寿命获得大幅度的提高，在置信度为95%时，激光冲击强化试件的中值疲劳寿命是未激光冲击强化试件中值疲劳寿命的54~145倍。

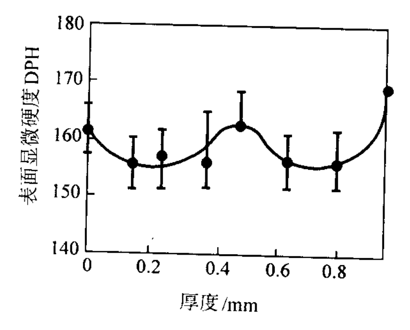
激光冲击方式对强化效果的影响如下。

激光冲击方式有两种，一是单面冲击，二是采用分束镜将激光分成两束同时冲击试件相对应的两表面，这两种冲击方式所产生的硬化效果大不一样。采用单面冲击时，应力波从冲击表面向金属内部传播，应力波峰压很快衰减，当应力波峰压小于材料动态屈服强度时，硬化效果消失，材料不再发生塑性变形，硬度值与材料基体部分相同。特别是当激光脉冲宽度较小时，硬化层厚度仅为几个至几十个微米。

当采用双面同时冲击时，从相对应两表面向金属内部传播的强应力波在试件中间相遇，发生叠加，使应力波峰压瞬间加倍，超过材料的动态屈服极限，发生塑性变形。图5.1-62a是从相对应两表面向金属内部传播的应力波在试件中间发生叠加的示意图。Clauer与Fairand用1.26×10^9 W/cm^{2}及1.12×10^9 W/cm^{2}功率密度的激光同时双面冲击厚1 mm的2024T351铝箔时，就发生试件中部位的硬度值显著提高，超过了材料基体部位硬度值的现象，见图5.1-62b。在双面同时冲击3 mm厚的2024－T351试件时也发现了这一现象。可见，双面冲击的强化效果比单面冲击强。



(a) 两冲击波同时从试件相对表面向中心传播而产生叠加的示意图



(b) 双面同时冲击厚1mm 2024－T351时所产生的试件纵横面硬度分布情况。功率密度：1.26GW/cm^2，1.12GW/cm^2。脉宽37ns。黑漆涂层，石英约束层

图5.1-62　两面同时冲击在试样中产生的冲击波

4.4.7　激光冲击强化技术的应用与展望

目前激光冲击强化在航空结构上主要用于发动机叶片的强化，在紧固孔方面只是对少量的其他方法难以强化的关键部位具有实用价值。

激光冲击强化技术在汽车工业上的应用前景十分广阔，如汽车上的连接杆、凸轮轴、曲轴、摇臂、齿轮和轴等。并可用于处理粉末冶金零件，以提高其表面密度等性能。

激光冲击强化还可使那些通常不能进行热处理的材料达到较高的硬度和强度。例如，铝合金焊接后热影响区强度的下降就可用激光冲击强化使其恢复到接近原来的水平。因此，激光冲击强化技术可用于提高铝合金构件的焊缝强度，如用于铝合金管件和船身铝壳体焊缝的强化等。

4.5　激光冲击成形

4.5.1　成形机理

在激光冲击强化中，如果被加工零件在激光冲击方向上背面的刚性约束被解除，则为板料的成形提供了空间，这将为板料的塑性成形开辟一种全新的成形方法——激光冲击成形（Laser Shock Forming，LSF）。其成形机理如图5.1-63所示。从激光器发出的高功率密度（GW/cm^{2}量级）、短脉冲（ns量级）的强激光束，冲击覆盖在金属板材表面上的能量转换体贴膜，使其气化电离，形成高温高压的等离子体而爆炸，产生向金属内部传播的强冲击波。由于冲击波压力达到数千兆帕，远远大于材料的动态屈服强度，从而使板料产生宏观塑性变形h。通过选择激光脉冲能量和脉冲宽度，可控制板料变形量；通过数控系统控制激光冲击轨迹、叠加方式和作用区域的脉冲次数，可实现板料的局部或大面积成形。图5.1-64为激光冲击0.6 mm厚SUS304不锈钢板变形的表面形貌。如采用预先制作好的凹模，可实现激光冲击波仿形。



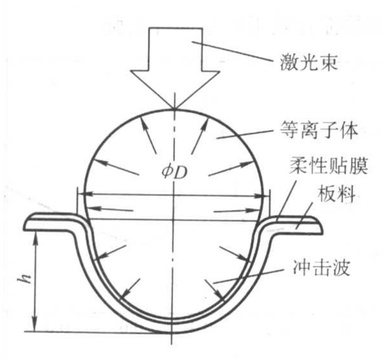


图 5.1-63 板料激光冲击波成形机理

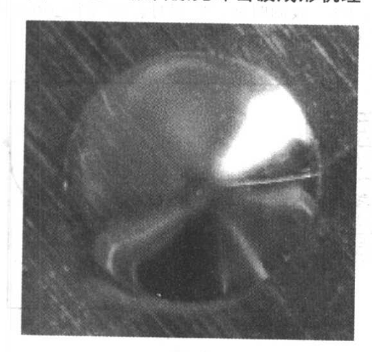


图 5.1-64 激光冲击变形形貌

4.5.2 技术特点

作为一种快速、高效的精确成形技术，激光冲击成形技术所具有的主要特点如下：

1) 激光冲击成形利用高能激光诱导的高幅冲击波压力的力效应，而非热效应实现金属板料的塑性成形，因而可把激光冲击成形归结为冷加工工艺。

2) 应变率高达 $10^7 s^{-1}$，其成形压力高达数千兆帕，可望使塑性较差的结构钢、钛合金和复合材料等用常规成形方法难以成形的材料进行全塑性成形。

4.5.3 工艺过程

激光冲击成形的基本思想如图 5.1-65 所示。由于激光器脉冲能量的限制，冲击成形中激光光斑的尺寸一般取为 ϕ5 mm ~ ϕ10 mm，当板料成形区域或成形深度较大时，就必须采用多点、多次冲击（就好比钳工用小榔头锤击钣金件），这时要根据板料成形件的精度分别采用粗冲成形和精冲成形。粗冲成形即激光冲击头作垂直于板料表面方向的冲击，采用类似于快速原型制造技术的等高线"分层制造"的成形思想，将复杂的三维型面根据被冲击材料的塑性变形量分解成一系列的二维等高线断面层，选用适当的激光参数（光斑尺寸、脉冲宽度、激光能量、光束模式）沿一定的冲击轨迹实施冲击后，板料产生变形量 h_1（如图 5.1-65a）。由激光位移探针检测后，调整冲击头和成形面之间的距离，再以优化的参数和轨迹实施第二轮冲击，板料的变形量增加到 h_2（如图 5.1-65b），如此直到满足成形件的尺寸要求，实现冲击量总和成形，运用了折线逼近曲面形状的原理。粗冲成形由于冲击头作等高线运动，致使成形表面粗糙度较大，在各次冲击后的搭接处会存在局部凸起 Δ。精冲成形是在原有二维分层面轮廓信息上求搭接面的空间法向矢量，冲击头倾斜，沿轮廓上各离散点法向矢量，采用适当的工艺参数对搭接面处实施冲击（如图 5.1-65b、c），运用了小平面逼近曲面形状的原理，从而更有利于提高板料冲击成形的精度及降低表面粗糙度（如图 5.1-65d）。

由于激光脉冲的宽度为纳秒量级，冲击波压力作用下板料的变形时间要比爆炸成形（1 ms 左右）还要低 4 ~ 5 个数量级，且成形压力高达千兆帕量级，这种异乎寻常的变形条件，使板料的激光冲击成形具有很多特殊的现象，可望使塑性差的难成形材料实现冷塑性成形。由于激光冲击成形具有超高压、高应变率和超快速等诸多特点，这为研究激光冲击波对板料的加载机制、板料在激波加载下的动态塑性变形响应、应力应变本构方程以及板料的成形性能等提供了很大的理论空间。

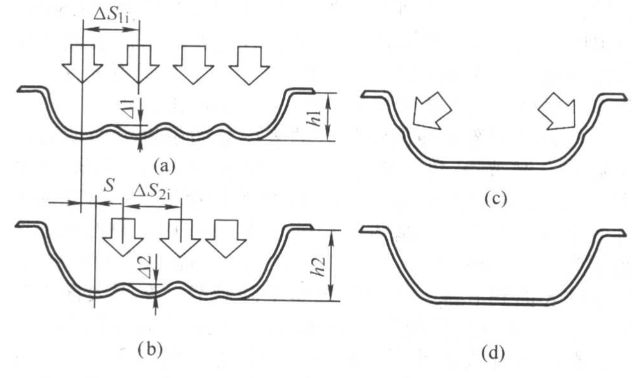


图 5.1-65 激光冲击波成形工艺过程

4.5.4 激光冲击下板料的变形

(1) 激光参数对板料变形的影响

激光脉冲能量的大小影响作用在靶材表面的冲击波压力大小，从而直接影响板料的变形。图 5.1-66 为不同的激光能量下，厚度 0.6 mm 的 SUS304/TiN 矩形薄板试样，在约束边界为 ϕ12/ϕ15 条件下板料变形的轮廓形状，其最大变形量与激光能量的关系如图 5.1-67 所示。从中看出，板料变形的截面形状像锥形，在激光能量较小，但大于板料变形所需的能量阈值即估算的 11J 左右时，能量的变化对板料变形的影响不太明显；当激光能量大于 15J 时，板料变形量随激光能量的增加而明显增大。由于受到板料变形能力的限制，当激光能量继续增大达到 22J 时，板料变形量的增大趋于缓慢。这说明激光能量的增加与 SUS304/TiN 板料变形量的增大是非线性的，在本实验条件下，当激光能量约为 20J 时，板料变形具有较优值，即在充分利用激光能量的同时，又能获得较好的板料变形量。

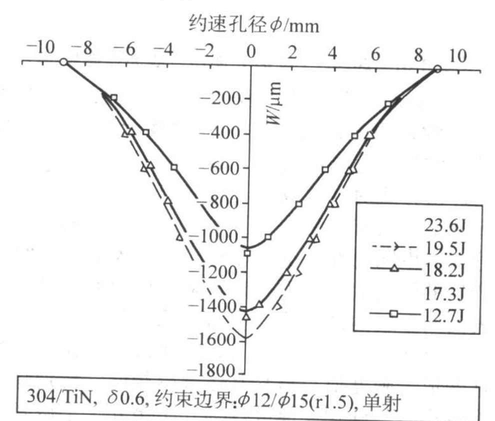


图 5.1-66 激光能量对 SUS304/TiN 试样成形轮廓尺寸的影响

对 6063 铝合金和 45 钢的板料试样进行激光冲击，在一定边界条件下激光能量对板料变形轮廓的影响如图 5.1-68 所示。可见在相同的约束边界条件下，当激光功率密度相同时，铝板的变形量比 SUS304 和 45 钢板料要大，这主要是因为铝靶的动态屈服强度比钢要低得多。图 5.1-69 为上述实验中板料的最大变形量与激光能量的关系曲线，表明随着激光能量的增加，这两种材料的变形量也随之增大。由于 45 钢的屈服强度较铝和不锈钢试样要高，其变形需要的冲击波



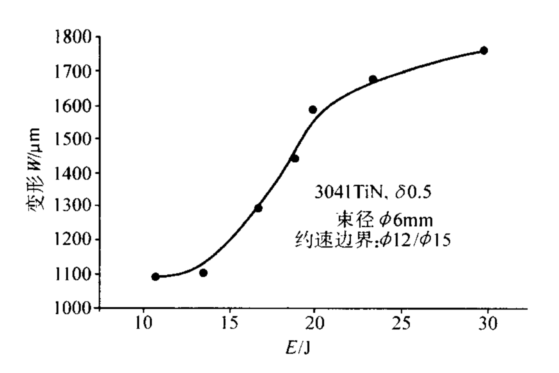
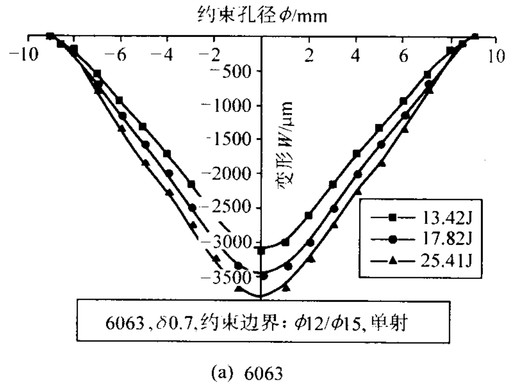


图 5.1-67　激光能量与板料变形量的关系

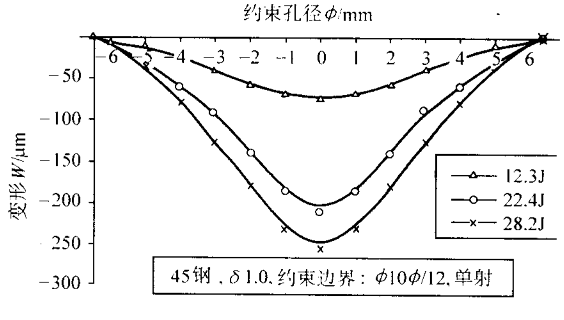
压力更大，而受到实验中激光器能量的限制，在激光能量为 28.20 J（接近激光器发射的最大能量 30 J）时，其最大变形量为 260 μm。但从图 5.1-63b 看出，其最大变形量随激光能量的增加几乎成线性增大，说明采用更大的激光能量可望使 45 钢产生更大的塑性变形。而 45 钢的塑性较差，用常规的模具冲压是很难成形的，初步的实验结果表明，在激光诱导的超高压、高应变率加载条件下，塑性较差的 45 钢也能进行冷塑性成形。这预示着将形成新的高应变率塑性成形理论，并开辟新的塑性成形技术。

（2）板料几何参数对变形量的影响

1）板料厚度　对厚度分别为 0.45、0.6、0.8 和 0.9 mm 外径为 φ30 mm 的 SUS304 不锈钢薄板试样，在 φ12/φ15 mm 的约束边界和相同的激光能量下进行单次激光冲击，用 Taylor

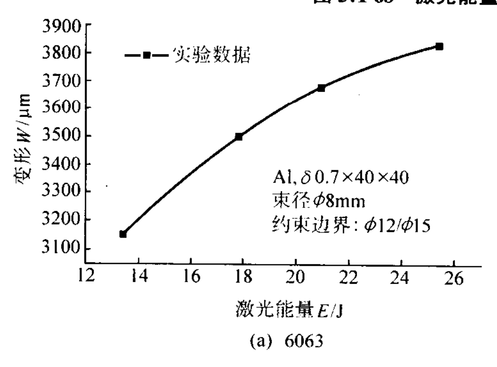


(a) 6063

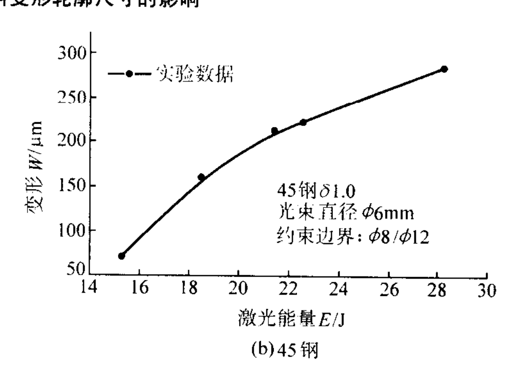


(b) 45钢

图 5.1-68　激光能量对对不同板料变形轮廓尺寸的影响



(a) 6063



(b) 45钢

图 5.1-69　不同板料的变形量随激光能量的变化趋势

Hobson 表面轮廓仪测量其变形截面轮廓形状，图 5.1-70 所示为激光能量约 18.8J 时部分试样的变形轮廓与其厚度的相互关系。通过对所测得的试样厚度与相应的最大变形量进行曲线拟合，得到图 5.1-71 所示的关系曲线。可见对于同一种靶材，随着其厚度的增加，其变形量几乎成指数衰减曲线变化，而其轮廓形状也由小圆锥形逐渐向小球冠状变化。

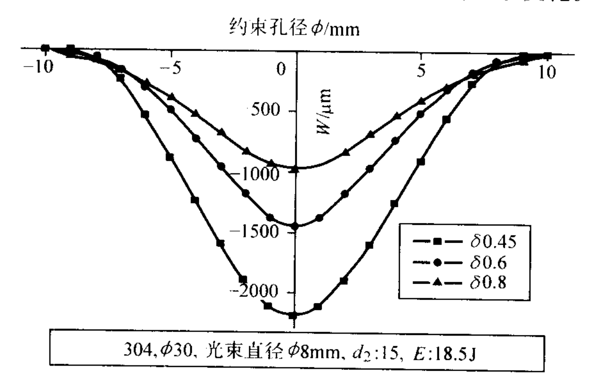


图 5.1-70　不同厚度的板料变形轮廓

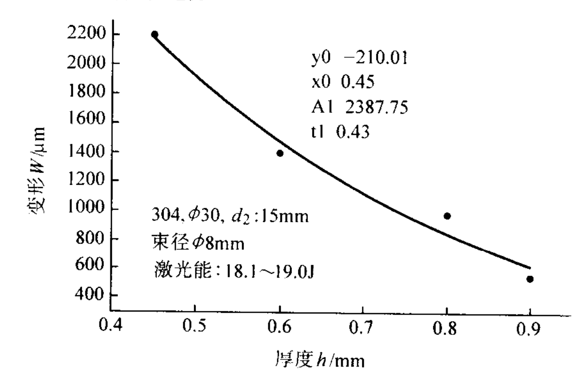


图 5.1-71　不同厚度的板料与变形量

2）板料尺寸　对厚度为 0.45 mm 的 SUS304 不锈钢，采用 φ20、φ30 和 φ40 mm 三种不同的外形尺寸，在 φ15/φ15 的约束边界上进行激光单次冲击实验，在相同的激光能量条件下，不同坯料尺寸试样的变形轮廓剖面见图 5.1-72。可见坯料尺寸不同，其轮廓剖面形状和变形量也有所不同，试样的外形尺寸越小，其变形量相对越大。测量各试样在变形前后

的外径变化以及变形区试样的厚度，发现试样变形后的外径、变形区的板料厚度都有不同程度的减小，在变形最大处（即顶点），板料变薄量最大。说明在高幅短脉冲激光冲击波压力作用下，板料试样的变形方式为拉伸与胀形的复合，原先被上压板夹紧在突缘的板料向凹模孔内发生了流动。由于支撑凹模孔径不变，试样外径越小，压边面积越小，流动就越容易；试样外径越大，压边面积越大，突缘材料的流动相对越困难，导致板料变形阻力增大，板料越不易变形，因而变形量就越小。说明在激光冲击成形中，也要合理选取板料的坯料尺寸，以获得最大的变形量。

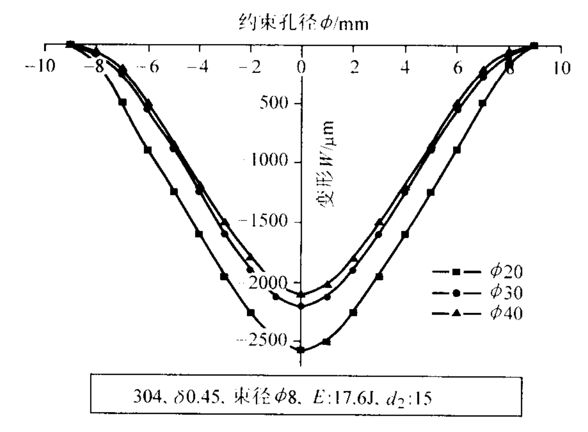


图 5.1-72　不同板料外径与变形量的关系

（3）搭接冲击时板料的变形

由于受激光器最大能量的限制，为了保证脉冲激光的能量密度以产生足够的冲击波压力，故经光路聚焦镜聚焦后的激光光斑尺寸一般小于 8 ~ 12 mm，为此对于大面积板料的激光冲击成形必须采用搭接冲击的方式，这样就存在多种参数的优化问题。在板料的后续激光冲击中，由于受到先前已变形板料的影响，在前后冲击的搭接区会出现“凸峰”，从而影响板料成形的轮廓形状和表面光整度。为了有效地控制并减小这些搭接区的“凸峰”值即不平度，必须探讨加工参数和激光冲击轨迹对搭接区不平度的影响。搭接冲击下板料的变形涉及冲击成形工艺，需要大量的实验研究，在建立加工参数和材料变形特性数据库的基础上，优化工艺参数，减小搭接区的不平度，才能控制板料激光冲击成形中的尺寸和形状精度。

4.5.5　激光冲击成形技术的应用与展望

激光冲击波成形作为一种快速敏捷的塑性精确成形的先进制造技术，其成形技术、工艺，以及装置的开发与应用，必将是钣金行业的一场具有重要意义的技术革命，具有广阔的应用前景，潜在巨大的经济效应和社会效益。

1）航空航天工业　宇航工业的生产特点是：产品型号更迭频繁、批量不大、零件的形状复杂多样、精度要求高、尺寸稳定性要求高、加工困难。由于这些特点，促使宇航工业特别重视也迫切需求高能的新加工方法，而激光冲击成形技术恰好适应了这种要求。①金属板材冲击成形后表面形成了很深的高幅值残余压应力，特别适合于制造有抗疲劳性能要求的钣金件，如飞机机翼蒙皮等，可减去常规的强化工艺。②适合于小曲率板材弯曲成形。由于是全塑性弯曲，无回弹，解决了常规工艺反复试模费工费事费钱的缺点。③适合于难成形材料的成形，如钛合金导弹尾翼的弯曲精密成形。④成形精确，成本低，速度快，特别适合于批量少的新品研制。激光冲击成形将是喷丸成形的替代技术。

2）汽车覆盖件和模具制造业　汽车车身覆盖件是汽车的重要组成部分，车身开发的关键在于模具的开发。一辆汽车上约有 80% 的零部件是用模具加工制造的。在“车型设计→模具设计与调试→投产”的整个周期中，模具设计和制造约占 2/3 的时间，模具的制造成本极为昂贵，成为车身改型的制约因素。由于汽车覆盖件大都属于浅拉延件，很适合于激光冲击成形，这样可省去或减少覆盖件模具数量。另外，由于激光冲击成形的独特优点，可对高强度结构钢板料采用激光冲击成形，进行适当修整和加固后就可直接作为模具实用，实现了钢板模具的快速制造。

金属板料的激光冲击成形是一种崭新的板料塑性成形技术，由于具有众多特出的优点，有望在一些特殊领域和中小批量零件的试制加工方面，显示出强大的生命力，也为实现板料的柔性化冲压成形提供了条件，它所带来的诸多研究领域具有极大的理论研究空间和应用价值。目前的研究工作刚刚起步，据实际工程中应用还有很大的差距，但正如上面所说，激光冲击成形具有潜在巨大的应用前景，为此必须在成形系统、工艺、控制技术上作进一步深入的研究工作。

4.6　激光热应力成形

激光热应力成形是国外 20 世纪 80 年代中后期提出的一种新的金属构件成形方法。1985 年，日本学者 Y.Namba 首次公布了用激光成形技术构建宇宙空间站的设想，以 S45C 碳钢激光硬化处理为例研究了板料的温度分布和热变形，提出了一种在不加外力的条件下，利用激光诱发的热应力来实现板料塑性变形的新工艺——激光成形，并用简单的弯曲试验证实了板料激光成形的可能性。美国一个研究小组将该技术用于海军舰船的制造。美国学者 Scully 利用激光作为热源进行船体钢板的弯曲，并用它取代传统的火焰成形工艺。波兰科学院技术研究所的 H.Frackiewicz，设计了专用成形设备，先后制造出了筒形件、球形件、带凸缘的管形件及波纹管等，其研究成果已在波兰、美国、日本及欧共体申请了专利。德国埃尔兰根大学 F. Vollertsen 教授领导的激光成形研究小组提出了一种通过激光切割和激光弯曲生产灯座的快速成形方法和三维激光成形匙形部件的工艺。德国学者 M. Geiger 等进行了汽车覆盖件的柔性校正和其他异形件的成形，并且在激光弯曲成形机理、工艺、成形后材料的组织性能、数值模拟、激光成形与其他加工工序复合化等方面作了一系列工作，对弯曲成形过程进行计算机闭环控制，提高了成形精度，弯曲角精度可达到 ± 0.2°。德国 Trumpf 公司于 1997 年开发了商品化激光成形多用机床 Trumpf3030。

国内的有关研究起步于 90 年代初。燕山大学和西北工业大学等学者对此进行了较为系统的研究，如采用非线性有限单元法，用间歇跳跃式移动光源模拟激光束的连续扫描，对厚板激光成形时的温度场进行了数值模拟。实验研究表明，激光热应力成形的材料非常广泛，包括各种碳钢、不锈钢、合金、有色金属以及金属基复合材料等，利用激光成形就可以加工常规成形工艺不能加工或很难加工的材料（例如钛合金）。

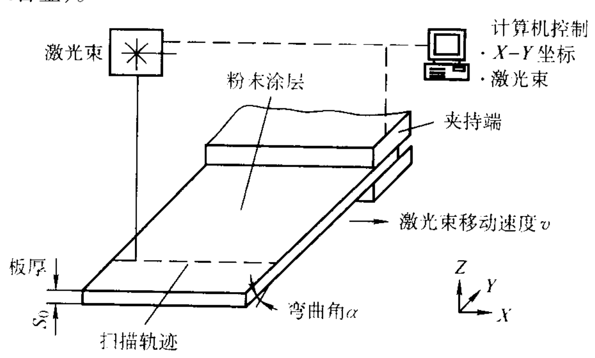


图 5.1-73　激光热应力成形示意图



与常规成形相比，激光热应力成形有一些独特的优点：

1）采用激光源作为成形工具，属无外力非接触式成形，成形精度高；

2）属于无模成形，生产周期短，柔性大，可不受加工环境限制；

3）属于热态成形，可成形在常温下难以成形的脆性材料和高硬材料；

4）对激光束模式无特殊要求，易于实现成形、切割、焊接等激光加工工艺的复合化，特别适合于大型工件、小批量或单件产品的原型制造。

上述特性使激光热应力成形工艺为材料加工工程学科提供了前所未有的新的生长点、强有力的深层研究工具和新技术突破点，同时也顺应了敏捷制造、柔性制造以及绿色制造的发展趋势。激光热应力成形这一新的材料加工领域具有广阔的应用前景，但它还是一种相对较新的工艺，激光成形的规律还有待于进一步研究。

4.6.1 激光热应力成形机理

材料的应力－应变曲线随着温度而变化，温度升高，材料的屈服应力降低。因此在激光照射中，局部被高温加热的区域产生塑性变形，激光照射之后，热量向材料内部传导而迅速冷却，使加热部分收缩。由于有塑性变形区存在，因此材料不能恢复到原来的形状，而向下凹陷。最终的变形是两者的叠加。

激光热应力成形主要包括两个阶段，即加热和冷却两个阶段。加热时，要求有聚焦或部分聚焦的高能激光束照射在要成形的金属板料表面。加工过程中，要对聚焦的程度、激光功率和往复摆动的速度进行控制，以使材料表面软化或熔化区宽度在0.3～1 mm到大约板料厚度的一半之间。板料的背面保持完全不受影响，激光通过板料上表面（加热表面）和下表面的穿透梯度，使金属上表面在激光束的作用下进行扩展、收缩，从固态到液态再从液态到固态而引起了热变形。激光加热区域的冷却既可以采用自然冷却，也可以用液体或气体随着激光束的运动在金属表面强行冷却。激光加热的目的是金属沿着激光扫描轨迹的垂直线向着激光束的方向进行弯曲，因为冷却和收缩，导致材料上表面收缩到一起。很显然，变形的速度和程度要依赖于激光的参数和材料性能。

金属板料激光热成形的变形过程是通过激光加热金属板料所产生的弯曲应变（平面外应变）、平面内应变或两者的联合作用来实现的。弯曲应变或平面外应变使金属板料产生角变形（如图5.1-74a所示），而平面内应变则使金属板料实现 XY 平面内成形（如图5.1-74b所示）。例如板料的缩短就是通过激光扫描在整个厚度方向上产生的类似应变来实现的。

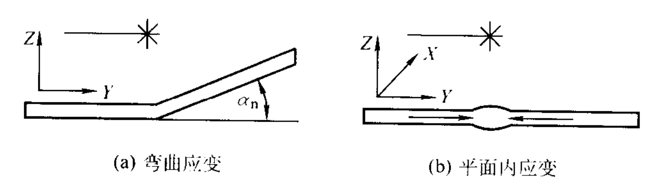


图 5.1-74 弯曲应变和平面内应变示意图

根据激光成形过程中的工艺条件和所形成的温度场分布等的不同，可以将成形机理分为温度梯度机理、增厚机理、翘曲机理和弹性膨胀机理。

1）温度梯度机理　温度梯度机理（TGM）是文献报道最多的激光成形机理。这种机理可以解释板料在平面外应变下实现弯曲。

高能激光束沿金属板料表面扫描时，当光束的能量密度较大而扫描速度又较快时，板料照射区域上表面瞬间（通常小于0.1 s）加热至高温状态（不超过材料的熔点）；而下表面由于没有直接受到激光的照射，其温度在这一短暂的过程中没有明显变化，此时在加热区的板厚方向上产生很大的温度梯度。根据温度对金属热膨胀量的影响，板料上表面的膨胀量远远大于下表面，从而使板料产生沿扫描轨迹背向激光源的弯曲，即反向弯曲。但是，由于未被加热区域抑制了反向弯曲的进行，使加热区域受到压迫，而金属材料的屈服极限降低，因而在此热应力的作用下，上表面处的材料产生较大的塑性变形，出现材料堆积。在冷却时，由于热传导的作用，被加热区域大部分热量流向周围区域，上表面附近的温度很快降低而下表面的温度逐渐升高，厚向温度梯度减小，光照区域金属的屈服极限升高，使加热过程中产生的材料堆积不能复原，而此时下表面附近的金属膨胀，使板料又产生面向激光源的正向弯曲。正反向弯曲变形的角度差，即为激光束一次扫描所形成的弯曲角。

2）增厚机理　当激光束的能量密度和扫描速度都较小时，材料在加热区的温度梯度主要表现在板平面方向上。由于加热区域材料的热膨胀使材料产生堆积，所以在冷却过程中，这部分材料不能完全复原而产生板厚方向的正应变，即板料的增厚效应。增厚机理与翘曲机理相比，除了加热区域小以外，其他加工参数几乎一致。由于受到加热区周围的材料约束，材料沿厚度方向，几乎以常应变的方式被压缩。这导致了材料厚度方向增加而长度或宽度减少。通过正确的选择加热路径，将板材加工成特定形状的零件是完全可能的。

3）翘曲机理　在加热区较大而且温度梯度较低的情况下，板料容易形成翘曲变形。当激光束的直径较大，板料的热导率较高、板厚较小时，在较大的加热区域内板料厚度方向的温度梯度很小，由于周围材料的约束使加热区产生了压应力，致使板料产生局部翘曲。由于翘曲部分的材料仍然受激光束的照射，其温度升高引起了材料屈服应力的降低，于是翘曲区中心的材料产生塑性变形，而此时翘曲区两侧以及扫描路径上的其他区域依然是弹性变形。随着光束与板料的相对移动，扫描路线上的其他区域相继产生塑性变形，当光束到达板料的另一侧时，由于相邻材料的约束降低，翘曲区两侧的弹性反向约束减小，从而使板料产生一定的弯曲变形。利用这种机理，可以实现薄板料的成形，而且还能控制弯曲角是趋向还是背离激光束。这种机理也适合于管成形。

4）弹性膨胀机理　当激光束只照射一个点或局部块时，在板料加热区导致的热膨胀要比温度梯度机制的大。由于膨胀潜力大，就会消除周围冷态材料对其产生的塑性压缩，而只剩下弹性膨胀压缩。这种压缩形成的内应力，将会导致板料产生纯的弹性变形，使板料出现小的反弹弯曲。采用这种机制，不能通过在同一个位置反复加热来加大变形量，因为这样会使上一次获得的弹性变形首先松弛，然后重复其膨胀过程。要使变形量增大，只能通过对邻近区进行点或块照射。

4.6.2 影响激光热应力成形的主要因素

对于纯金属和合金材料都能够激光成形，并且随着照射条件的不同，弯曲角也不同。材料在成形中所需要的工艺参数与激光参数、材料种类和尺寸（厚度）等有很大关系。对于不同的材料，需采取不同的工艺规范。影响激光成形的主要因素有：激光参数、材料性质和板料几何参数。

如果加工时参数选择不合理，在实验中也会在一些材料表面产生一定程度的痕迹，例如由于脉冲激光而引起的“鱼鳞化”等。从目前公开发表的文献看，研究工作仍处在试验研究阶段，且多集中在简单弯曲方面，缺乏对板料成形机理的深入研究。

1）能量因素　激光弯曲中，能量效应可用材料吸收的

能量密度（单位表面积吸收的能量）以及吸收该能量所用的时间来表示。能量密度又取决于材料对激光的吸收系数、激光输出功率及相对于弯曲件表面的焦距。扫描速度反映了材料对激光能量的吸收时间。此外，扫描次数和轨迹也影响激光的吸收。实验证明，在输入总能量一定的前提下，大能量密度的输入、短时间的加热有利于增加弯曲角。

① 激光功率和扫描次数对弯曲角的影响　图 5.1-75 为诱发热应力成形角度随激光功率和扫描次数变化的曲线。由图可知，对于同样的激光功率，随着扫描次数的增加，诱发热应力成形角度呈近似线性增大。并且，当激光功率增大时，$\alpha-N$ 曲线的斜率增大。由此说明，随着激光功率的增大，诱发热应力成形角度增大。图 5.1-76 为薄板诱发热应力成形角度随激光功率变化的关系，诱发热应力成形角度先是随着激光功率增大而增大，当激光功率达到 900 W 左右时，诱发热应力成形角度达到最大值。随后，诱发热应力成形角度随着激光功率的增大而减小。

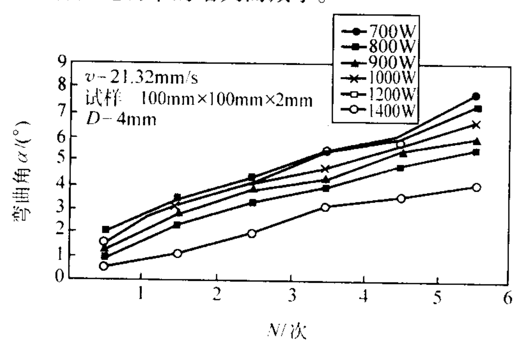


图 5.1-75　激光功率和扫描次数对弯曲角的影响

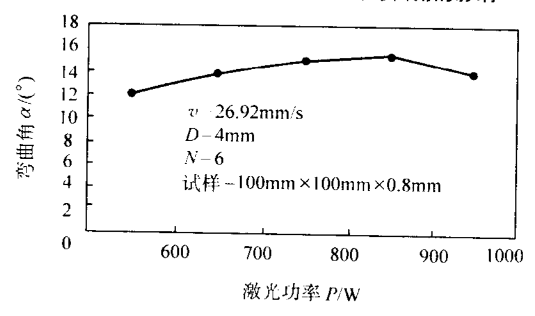


图 5.1-76　激光功率与弯曲角的关系

② 扫描速度和扫描次数对弯曲成形角的影响　激光照射可以在同一直线上反复进行，也可以用激光在二维平面上全面扫描。显然当后者激光扫描的间隙充分地拉开时，其热变形量为激光照射一次的变形量的积分值。但是在其他情况下，就不能保证 N 次激光照射所产生的变形量为一次照射所产生的变形量的 N 倍。

激光热应力成形的角度随着扫描速度的增大而减小，如图 5.1-77 所示。激光移动速度越慢，弯曲角也就越大，当移动速度 $v=1$ mm/min 时，进入材料中的热量过多，沿着材料向里打出一熔化的孔。如果按照图中的照射条件工作，材料的表面不会熔化。当激光输出功率一定时，与单位时间的弯曲角相对应存在一个最佳激光移动速度。

③ 光束直径对弯曲角的影响　当光束直径小于塑性区尺寸时，虽然光束直径增大将使线能量密度减小，但因为加热区的增大使得用于发生塑性变形区域增加。因此，在这种情况下诱发热应力成形角度将会随光束直径的增大而增大。一旦光束直径大于塑性区之后，随着光斑直径的进一步增大，线能量密度减小的趋势将占主导地位，使得板料厚度方向的温度梯度减小，故诱发出的热应力减小，导致诱发热应力成形角度减小。

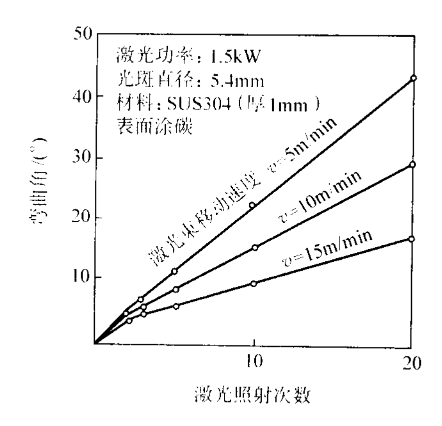


图 5.1-77　不锈钢激光成形后的弯曲角与激光照射次数的关系

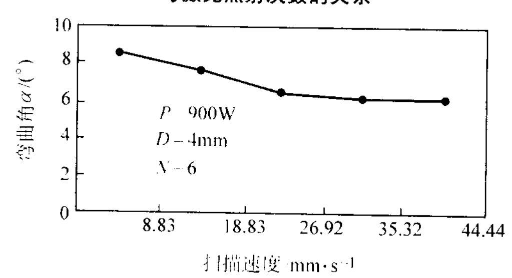


图 5.1-78　扫描速度与弯曲角

2）材料的热物性和力学性能因素　材料的热物性和力学性能对激光弯曲的影响较为复杂，目前尚无法对此进行定量分析。主要包括材料的热膨胀系数、比热容系数、热扩散系数、屈服极限、弹性模量和硬化指数等参数。实验证明，在同样的工艺条件下，材料的比热容和热导率越大，则成形过程中的温度梯度越不明显，由此产生的热应力也越小，最后产生的弯曲角也就越小。屈服极限低、弹性模量小、硬化指数小的材料，容易产生大的变形，在同样的工艺条件下，可获得大的塑性弯曲角。图 5.1-79 是几种不同材料的弯曲角随扫描次数变化的关系曲线。

输入能量一定时，弯曲变形临近区域的温度在薄的部位可能要比厚的部位高，这样材料系数更容易下降得快，这是因为板厚的地方热量散失得相对容易。要想使板厚的地方有效地弯曲成形，就必须增加能量输入的密度，这可以通过高的激光脉冲率或慢的扫描速度来实现。但是实际加工中发现，这样会导致产生很深、很窄的扫描轨迹，几乎发生材料切割的现象。一种更有效的方法是用较宽的、发散的高脉冲率的激光束在弯曲线上产生宽的浅的轨迹。

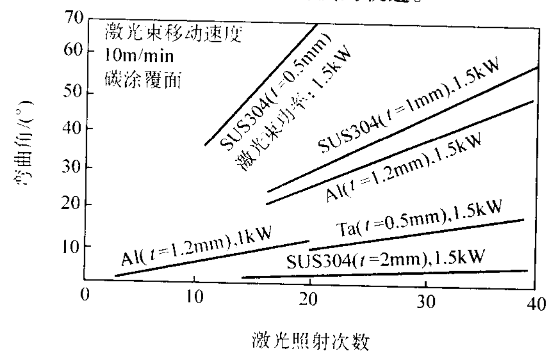


图 5.1-79　不同板厚的扫面次数与弯曲角的关系

3）材料的几何参数　影响激光弯曲角的几何尺寸因素主要是弯曲件的宽度（沿弯曲线方向上的尺寸）和板材厚度。由图 5.1-80 可知，在同样的参数下，薄板的诱发热应力



成形角度大于厚板的诱发热应力成形角度。板料越厚，截面模量越大，刚性也越大，因而诱发热应力成形变形的抗力也越大，塑性诱发热应力成形变形量减小、从而使得诱发热应力成形角度减小。

对于激光弯曲来说，在特定的工艺条件下，厚度的影响主要体现在弯曲角度上。厚度越大，所获得的弯曲角就越小。当厚度超过某一极限值时，板料将不产生任何塑性弯曲。板厚也不能太小，否则材料将被熔化，无法实现激光弯曲。板料宽度对弯曲角度的影响亦很大；通常激光束的直径很小，使得同一时刻被加热材料的范围也很小。上述弯曲工艺中被加热处产生塑性变形时，其他在宽度方向上还没有被照射到的材料和已经变形完了的区域，属于不变形的刚性区，它对正在进行变形的材料起了一个刚端作用，阻碍其变形的进行。板料越宽，这种刚端作用也就越明显。实验的结果初步证明：刚端对加热过程中反向弯曲的阻碍作用大于对冷却过程中的正向弯曲的阻碍，所以材料越宽，一个加热冷却循环所能获得的弯曲角也就越大，但是，板宽超过一定值时，其影响不再显著。

另外，激光成形中，坯料的放置、夹持等也会影响成形质量，在具体的加工中，要根据实际情况决定。

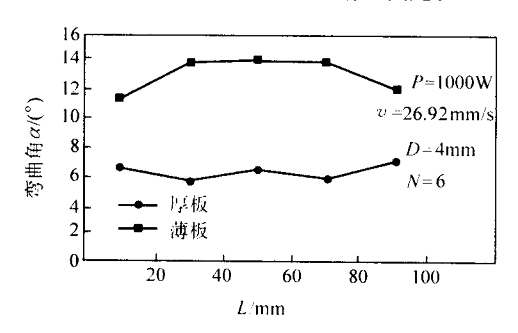


图 5.1-80　板料厚度与长度与弯曲角的关系

需要指出的是，由于激光弯曲是一个热力学与塑性力学综合作用的复杂的瞬间热物理过程，材料的热物性参数与常规加热过程相比发生很大的变化，因此，很难用传统的解析方法求解温度场和应力－应变场的变化规律。又由于温度变化极快，直接测量温度较为困难。因此，借助于计算机对此非线性热物理过程进行数值模拟是一种行之有效的手段，弹塑性有限元模拟可以分析更复杂形状的成形问题，它们考虑到激光参数、与温度有关的材料性质、热应力、内应力等对复杂几何形状成形的影响，模拟结果形状随后可以通过实验手段检查和证实。这有助于在理论上进一步揭示激光弯曲成形加工的特点，而且还能在工程上指导工艺参数的设计，加快这项新兴工艺的产业化。

5　激光微细加工

5.1　概述

现代制造技术具有两大发展趋势，一是制造系统的自动化（包括自动化、柔性化、集成化和智能化等）；二是精密微细加工技术的开发和应用。精密微细加工技术是以精密工程、微细工程和纳米技术为代表，寻求达到制造技术所能实现的超高精度和微小尺寸极限的加工技术。精密微细加工技术是衡量一个国家制造业整体水平的重要标志之一，它不仅决定机械产品的加工精度和表面质量，直接影响产品的国际竞争力，而且可反映尖端技术和国防工业水平。一般来说，精密加工技术是指加工精度在 1～0.1 μm、表面粗糙度 R_a 在 0.1～0.02 μm 之间的加工技术；超精密加工技术是指加工精度高于 0.1 μm、表面粗糙度 R_a 小于 0.01 μm 的加工技术；微细加工技术则是指微小尺寸零件的加工技术。精密加工和微细加工同属现代制造业的前沿技术，两者有着密切联系。微细加工既属于精密加工范畴，但又有其自身特点，两者相互渗透，相互补充。

微细加工是当今制造业最为活跃的研究方向之一，在许多领域中有着重要和广阔的应用前景，在国防工业的作用尤为重要。微型化、精确化、轻量化是航空航天产品的主要发展特征，这些都与微细加工技术密切相关。微型飞机、微型发动机、微型微星的研制，航空机械装备、惯性导航系统性能的提高都不同程度地取决于微细加工技术的水平。

微细加工任务不是由某一项技术独自完成的，而是由许多方法和技术共同承担，这些方法各具所长，相辅相成，构成了微细加工技术群，承担着丰富多样的微细加工任务。

在一个时期内，微细加工主要涉及微米级的精度、结构和形貌，这是由已有的微细加工技术所具有的能力和工业需求所确定的。从发展的角度来看，微细加工应该包括微米级加工和纳米级加工，或者说，微细加工技术正在向纳米尺度领域拓展。

大规模集成电路和集成光学的发展，要求器件日趋高密度化、高集成化和多功能化。为适应这种要求，制造工艺技术必须满足图形精细化、过程低温化、控制精密化、环境超净化的要求。基于这些技术要求，逐渐形成了以电子束、离子束、激光束为中心的新兴技术，即微细加工技术。所谓微细加工技术是指制造微小尺寸零件和图案的生产加工技术。与传统的湿法技术相比，这种技术有时也称为干法加工技术。从加工精度考虑，也有人称之为亚微米加工技术。

近年来，各种新技术（如微电子技术、计算机技术、自动控制技术、特种加工技术等）在精密微细加工中得到非常广泛的应用，使精密微细加工技术产生了飞跃式发展。本节重点介绍了激光微细加工技术这种新的加工方法特点、应用和发展情况等。

激光微细加工系统可对塑料、玻璃、陶瓷及金属薄膜等多种材料进行加工，精度可以做到微米级。其产品广泛应用于半导体及微电子加工、生物医疗器械生产、计算机制造业、电子通讯等各个领域。如图 5.1-81 所示为一些激光微细加工产品的实例。

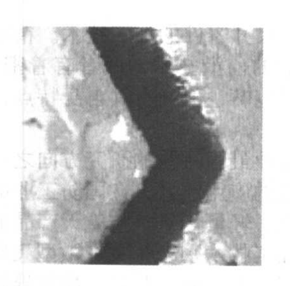
系统组成包括激光器、光路系统、调节平台、控制器，能满足不同的加工要求。

5.1.1　加工机理

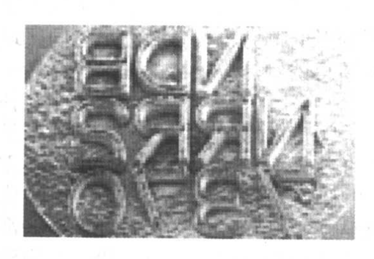
在强功率激光辐照下，固体的光学性质将发生很大变化，静态介电函数不再适用，光吸收系数也受到影响。首先，激光引起的热效应将导致材料密度或电特性改变，在介质中产生热自聚焦效应。其次，在半导体和绝缘体中，强激光吸收将导致带间跃迁或碰撞电离，形成大量自由载流子，结果使材料的吸收系数急剧增大，并可能引起材料的严重损伤。另外，强激光电场还可能引起固体中电子轨道或整个分子的非线性畸变，从而导致多种非线性光学现象，包括自聚焦与多光子吸收等。在强激光与固体相互作用时，材料表面的形貌也会发生改变，产生一些某种图样的皱纹或损伤。所有这些现象，在采用强激光对材料表面进行处理的过程中，都具有不同程度的重要性。

分析激光加工过程，影响激光的主要因素有激光照射焦面上的能量分布、发散角、焦距、最小束斑直径、被加工材料等。

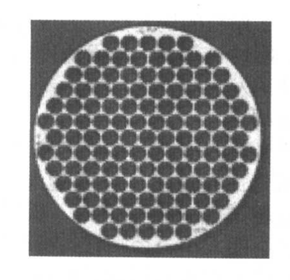
图 5.1-82 所示是激光照射时焦面上能量分布情况。将波长为 λ、束径为 d、输出面上功率为 P 的平行光线，用焦距为 f 的透镜聚焦，则能得到同心圆状的衍射象。由衍射理论可知，在这个焦点平面上，其能量分布是不均匀的，在束径中心，即焦点上的辅助度 E_0 用下式表示：



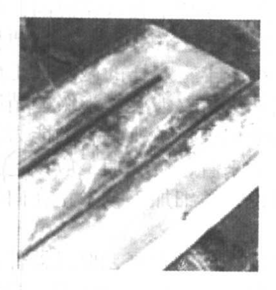
(a) 在铝上刻槽



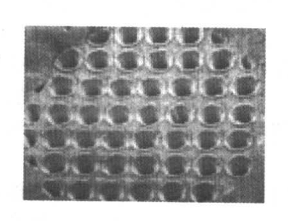
(b) 在铜上刻字，字宽40μm



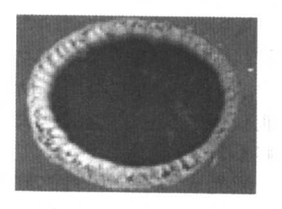
(c) 在硅片上打孔，直径为5μm



(d)陶瓷上刻槽(深度750μm)



(e)直径为25μm的孔阵列



(f) 钼上打孔，直径为100μm

图 5.1-81　激光细微加工的例子

$$E_0 = \frac{\pi}{4}\frac{d^2}{\lambda^2 f^2}P \tag{5.1-44}$$

而中心愈远，则辐照度愈弱。

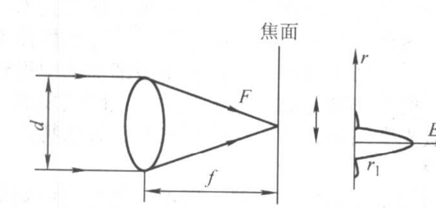


图 5.1-82　激光照射焦面上的能量分布

从图中所示能量的分别状态可以看出，使辐照度第一次为零的分布半径为 r_1，它可由下式得到：

$$r_1 = 1.22\frac{\lambda f}{d} \tag{5.1-45}$$

可见在半径 r_1 的圆面积上集中了全部光通量的 84.4%。由上式可以得到激光照射聚焦时的束斑直径为

$$d_1 = 2.44\frac{\lambda f}{d} \tag{5.1-46}$$

考虑到发散角 θ 的影响，则束斑直径为

$$d_1 = f\theta \tag{5.1-47}$$

$$\theta = 2.44\frac{\lambda}{d} \tag{5.1-48}$$

由于激光有非常好的相干性、单色性、方向性，从激光器发出的全部光通量虽然不大，但进入谐振腔的光都是以固定波长向固定方向发射，因此聚焦后就能获得非常大的功率密度，如红宝石激光聚焦时，其焦点上的功率密度可达 10^9 W/cm^2，如果将金属材料放在焦点上，其表面温度将被加热到 10^4 ℃。

5.1.2　激光器类型

在应用激光技术进行微细加工中使用的激光器主要有：CO_2 激光器、YAG 激光器、铜蒸气激光器和准分子激光器等。

CO_2 激光器和 YAG 激光器是该领域常使用的工具。YAG 激光器更适合需要自动控制、小公差及高重复率的场合。在多数情况下，激光辐射波长和激光光束的质量决定了加工元件的极限尺寸。使用辐射波长 $\lambda = 10.5\ \mu$m，具有衍射极限的 CO_2 激光器和用 YAG 激光器能加工元件的最小尺寸约为几十微米。

1）用于微细加工的 CO_2 激光器　DEOS 公司展示了亚微秒激光脉冲的微细激光加工能力。光脉冲从密封的 CO_2 激光器平台发出，利用新颖的 Q 开关技术产生 150 ns 的脉冲。用该种激光器加工的几种材料展现了非常好的性能，如较好的成形，清洁的边缘，很好的持续性，以及最小的热影响区。

封闭式 CO_2 激光器因其可靠性高，费用低廉，输出特性优异而广泛应用于材料加工中。在微细加工中，使用脉冲输出而不采用连续输出是因为脉冲产生更高的峰值功率，仅使用平均功率就能够在诸如陶瓷类物质上打孔或刻槽。而更为重要的是，脉冲输出对精细和薄的物质影响小。红外激光器通过集中热量来蒸发物质，因而不可避免地破坏了周围物质的机械特性。一束低的短脉冲和高峰值 M2 激光束可以减小热影响区的面积，因为照在其上的能量被有效用来处理工作物质，短时间存在的激光束的热光斑减少了过量热扩散到周围基片上的可能。

封闭式 CO_2 激光器一般是通过迅速开关激发激光的径向电流而产生脉冲，激光脉宽被限制在几十微米，这与连续光相比已有很大改进，但在一些材料上仍会产生相当大的热影响区。况且这样的激光器在高频率下不能实现全深调制，从而产生连续波热效应，使热影响区变大。用声光调制器产生更短的脉冲仍需要进一步突破微秒的障碍。红外声光调制材料对热透镜效应很敏感，因而限制了它们在内腔中的应用。实际上，声光调制器在商业上仅用于外腔开关 CO_2 激光器，如用作高速快门，使用时没有增益，峰值功率也不增加。

采用新型 CO_2 激光平台解决了技术上的限制。这种以电光调制为基础的平台早已应用于高性能的雷达上。设计采用折叠式陶瓷波导谐振腔和一种获得专利的电光调制器。电光调制器采用碲化镉材料，配备一个增透窗，电光调制器直接安装在谐振腔上，有很高热传导性的硒化锌窗从调制器的输入和输出面吸收热量，保证了性能的稳定性和持久性。与以往的调制器相比，内腔调制器的损伤阈值和可靠性有了显著提高。



DEOS公司现已获得了脉冲持续时间为150 ns或更短的脉冲，比传统的密封CO_2激光器短2个数量级。上升时间仅有0.5 ms/次，峰值转换功率为数千瓦。

在最初的材料加工研究中，用一个简单的平凸透镜聚焦激光输出，在工作面上产生直径大约为55 μm的光斑，即可在几种不同的塑料上打孔、刻槽和打标。无论何种情况，CO_2激光处理过程中的外围焦化已不复存在。DEOS公司正投资加工熔烧过的陶瓷，这通常需要一个平均功率数百瓦的激光器，然而DEOS的工程师们相信，用一个平均功率只有20 W的快速脉冲激光器就足以刻划用于表面安装电子元件的陶瓷基片。

2）用于微细加工准分子激光器　准分子激光是采用脉冲放电泵浦稀有气体卤化物的紫外激光器，其辐射波长比较短，在193～351 nm的紫外波段，它们的输出功率可达200 W。KrF激光器（$\lambda=248$ nm）和XeCl激光器（$\lambda=308$ nm）具有传统的工作寿命长的特点。但辐射紫外波段（$\lambda=193$ nm）的ArF激光器使被加工元件的寿命变短。与其他工业用激光器相比，准分子激光器波长最短，能实现最细的聚焦和更小尺寸的加工。

准分子激光可以用于微电子部件（主要是柔性电子学电路）上的钻孔、切割、开槽和打标等。由于准分子激光产生的是短波长激光，脉冲时间又短，因此属于“冷加工”形式，不会对基板产生热效应。日本松下公司设计了一台准分子激光在印刷电路板上打孔的设备，激光器以500 Hz重复率运转。用传统方法，每秒打直径为100 μm小孔5～10个，采用准分子激光可以打0.5 μm小孔，如要打大孔可用小光束扫描，现在每秒能打孔20个，比传统方法提高效率2～4倍，而且不产生热效应，使产品质量提高。

这种微加工的原理是激光脉冲能量密度在材料表面达到一定阈值以后，材料会在很薄一层内发生气化。表5.1-22给出不同材料阈值及消融速率。

表5.1-22　紫外准分子激光消融阈值和消融速率

材　料	消融阈值	最佳能量密度	消融速率
聚合物	约0.2 J/cm^2	0.2～2 J/cm^2	0.1～0.5 μm/脉冲
玻璃、陶瓷、硅	约1 J/cm^2	2～20 J/cm^2	0.05～0.2 μm/脉冲

电子元器件表面的标记可用激光打标方法来实现，用几十微焦耳的脉冲能量就可以将数字、字母和符号标刻在硼酸盐玻璃上，标刻深度约为1～15 μm。它是将激光束像一支笔一样在玻璃表面上“书写”，书写的字母和图案由计算机控制。

当脉冲能量较大时，准分子激光的另一个重要应用是细导线的剥线。许多导线外部绝缘层的剥除要求无刻划痕，尤其是在军事和航空应用中。激光处理是非接触而不是机械式，满足无刻痕要求不成问题。

在很细导线的应用上，机械技术很易弄坏导线。若在显微镜下手工操作，则过程单调易使操作者失误。通过使用CCD成像光学观察系统和精密移动设备，并引用两束分成180°角的光可以获得精确的激光剥除效果。

3）其他类型的激光器　铜蒸气激光器能在511 nm和578 nm波长上具有几百瓦的输出功率，而且光束质量好，可会聚成很小的光点。这些辐射波长加工的元件尺寸比用CO_2和YAG激光器加工的尺寸还小，最小可达1～1.5 μm，也很容易加工。例如：铝、铜、硅和不锈钢均已试验成功。陶瓷、金刚钻和许多过去认为很难加工的材料现在都可以用铜蒸气激光器加工。但是，铜蒸气激光器有其不足，使其技术设备在外形尺寸、价格和可靠性等方面受到限制。

激光加工是激光光束与材料相互作用的过程。紫外线与材料的相互作用是冷过程。在这个过程中，激光辐射能量主要用于断开化学键，比加热材料消耗得多。而长波长（红外和可见光波段）激光和材料之间的相互作用是热过程，它导致材料的碳化，使表面质量变差。虽然使用长波长激光器时，冷过程可以由使用短脉冲来获得，但没有高的脉冲重复频率不可能达到高的加工速度。

用准分子激光器微加工聚合物技术已成功地应用在微电子行业中。用激光微加工聚合物表面，可代替原来的化学腐蚀和光刻技术，而且使器件做得更小，集成度更高，工序更少。使用KrF（$\lambda=248$ nm）激光器，一种新的干涉测量技术在聚亚胺上直接刻蚀出宽度小于100 nm的线条，不仅大大优于普通光刻，而且可与X光、电子束技术相比。最近报导，用准分子激光刻蚀出的线宽已小至30 nm。

日本工业技术院机械技术研究所用激光对玻璃做微细加工获得成功，使用的是YAG:Nd激光器和准分子激光器。YAG:Nd激光能打出直径约为80 μm的孔，准分子激光能打出直径约为0.5 mm的孔。预计它将在微型机械的压力传感器和加速度传感器的制作中发挥作用。

日本松下技术研究所开发的准分子激光多轴打印机，用光纤把激光分成15束，对基板的15处同时加工，最小孔径为30 μm，1个脉冲能打出深0.5 μm的孔。

Spectron激光系统公司的新SL500系列为精密微加工和打孔提供了一种高频脉冲激光。SL是精密切割工具，用YAG:Nd激光切割0.05 mm厚不锈钢，速度超过400 mm/min时，切口达20 μm。高脉冲频率也能确保极好的边缘质量和切边的平直度。由于系统的可控性，也可用于陶瓷、硅、石墨之类材料的切割、划线和打孔。脉冲频率为50～100 Hz，脉宽很短。

英国牛津公司（Abing don）开发了计算机打印机中喷笔嘴、燃料喷嘴和类似器件的铜蒸气激光器的打小孔技术，已在不锈钢上打出50 μm清洁小孔。铜蒸气激光器把高精度和严公差结合起来，可以钻直径小于2 μm的小孔，宽度小于5 μm的切割，对尺寸比大于50:1的加工也能实现。

5.1.3　激光微细加工的研究现状及其发展前景

德国Lambda physik公司和日本Matsushita Research Institute Tokyo Inc.共同研制了KrF准分子激光器，它用于在真空紫外波段的微小刻蚀。在脉冲能量为10 mJ和平均功率10 W时，准分子激光器以1 000 Hz的重复脉冲频率工作，能量不稳定性$<5\%$，改善波段248.4 nm±50 pm，辐射线宽0.8 pm，辐射波长稳定性0.1 pm。

英国的Exitech公司、德国哥丁根的Lambda physik公司和法国的电子中继公司共同研究了“用准分子激光的三维微加工”项目。该项目采用准分子技术来演示由SFIM ODS设计的复杂微加工技术用于光学研究生产，目的是达到全三维计算机辅助设计/计算机辅助制造的激光微细加工。现在，Ecxitech公司和汉诺威激光中心已演示基本的微加工技术。他们采用计算机数控系统控制孔径和形状均匀的准分子激光束，在工件上形成不同尺寸的矩形或正方形图像，依次加工各平面，全三维物体则连续制成。

在电子行业、半导体工业、通讯业、光信息存储及医疗仪器等方面，激光微细加工对普通的微机械加工有很大竞争力，受到世界各国的高度重视。欧洲、日本、美国政府均专门拨款用于研究和开发与微加工有关的技术，许多公司也竞相投资开展研究。

日本的微激光中心分析了世界激光市场，预计到2010年，微加工设备的销售额为197亿美元。

美国国防部发展研究计划管理局制定了在电子业用准分子激光器进行微细加工的计划。欧洲很多公司在几年前就开

始制造工业应用激光器，包括微细加工的高功率激光器。

随着激光微细加工技术的进一步发展和市场的扩展，这种先进的加工技术具有广阔的前景，必将得到越来越广泛的应用，并不断开发出新的微细加工技术，在国民经济和工业发展中发挥日益重要的作用。

5.2 激光制备薄膜技术

5.2.1 激光化学气相沉积技术（LCVD）

在半导体工艺中，化学气相沉积（以下简称 CVD）技术占有重要位置，而且由于往往需要反复多次使用，因此低温 CVD 就显得特别重要。高温 CVD 容易导致晶片翘曲，诱发新的缺陷、表面态变化及杂质再分布等，尤其是Ⅲ－Ⅴ族化合物半导体，500℃以上会导致Ⅴ族化合物的挥发，造成化学比失配。所以为了满足不断发展的大规模集成电路和集成光学技术的要求，激光 CVD 低温成膜技术得到了长足的发展。特别是准分子激光技术的发展及其在微细加工技术中的应用，为激光 CVD 技术带来了新的生机。

1）热解　激光照射在衬底上，在照射区内部加热。这种局部加热引起多种过程，如热电子能量传递、非辐射复合和激发晶格振动等。在这一局部区域施主气体进行类似于一般热分解 CVD 过程，形成薄膜。虽然是热分解，但在这种情况下热源是光能，因此激光波长的选择要使衬底具有较大的吸收系数，而对施主气体则是透明的。例如可见光和紫外线在半导体表面 0.1～10 μm 的深度内光子能量可被完全吸收，所以这种空间选择性加热，即使没有气相成核也能在高气压下进行薄膜沉积，并可得到很高的沉积速率。

这种方法适合于金属、半导体膜的沉积，特别是微细结构薄膜的沉积，但不适合于大面积成膜。

热分解激光 CVD 工艺通常要求连续运行的激光光源。因为用脉冲激光加热表面时，材料只能在极短的时间内保持高温，故即使采用脉冲激光，其脉冲重复频率也必须足够高，一般应在兆赫以上。目前这种热分解激光 CVD 主要光源是 CO_2 激光器和 Ar 离子激光器。

2）蒸发　如果大量光子直接注入到十分靠近衬底的固态靶材上，则类似于一般蒸发或离子溅射沉积，激光将原子从靶材移出，然后移向衬底并淀积，这就是激光 CVD 的蒸发机制。一般认为，被移出的原子遵从蒸发过程中典型的余弦平方分布，因其峰值超前的影响，导致沉积膜的均匀性和台阶覆盖性变差。

虽然这种机制对激光的选择最为简单，但因为所需要的表面诱发温度，任何一种高功率脉冲激光都可使用。目前也有几种连续激光器具有使低熔点材料蒸发的足够功率。当然对波长还要有所选择，主要是由于光吸收随波长强烈变化，如 Si 对 Nd: YAG 激光器二次谐波 530 nm 的吸收率比基波 1.05 μm 要高 10^3～10^4 倍。同时对 530 nm 的吸收深度也很浅，这样被加热体积就小。正因如此，这种机制用 Nd: YAG 二次谐波激光器。

3）光解　激光的单光子或多光子被施主气体材料吸收，致使施主气体物质处于激发态，如果在分解沉积极限以上，可使分子分解破裂。这种光分解产物在附近衬底表面沉积成膜。光解 CVD 又可分为 Hg 敏化光解和直接光解两种。

光解 CVD 情况与热解及蒸发机制不同，对激光器的要求也比较严格。这种方法依赖于施主气体的光分解，激光的最关键参数是波长，其工作状态可以是脉冲或连续的。为在大面积上高速沉积，要求有足够的将大量分子激发到高能态的光子能量或数量。一种情况是单个紫外光子，由于它具有较高的能量，比如在 4～7eV，于是每个光子可单独分解一个分子。另一种情况是多个光子通过多光子吸收达到较高的分解态。上述两种情况的光分解都是在确定的并可重复的体积下进行的，因此可实现选择光分解，而且对薄膜化学计算比的控制也优于等离子体分解。

施主气体源的选择是激光 CVD 的另一个重要问题。蒸发机制几乎适合于任何施主源，随着大功率激光器的发展，大多数材料的蒸发温度用激光都可以达到。对热分解机制的施主源也只要不吸收激光辐射即可，因此通常热 CVD 中的施主源都能满足需要。但光分解机制与上述要求大不相同。因为气相施主沉积的能力取决于分子的光吸收特性，因此必须具有足够大的吸收截面来吸收足够的光子，以实现激发沉积。以上分析说明，为了实现某些光分解沉积，必须依据光吸收特性去选择施主气体源。

5.2.2 激光沉积

在微电子和光电子等领域，激光辅助沉积可用于解决器件研制中常规淀积工艺难以解决的一些特殊复杂问题。首先，金属的激光辅助沉积使人们可能一步完成光刻掩模硬表面上透明缺陷的修改；第二，在作激光沉积的时候，同时用激光对衬底表面加热，即可实现半导体掺杂图样的直接写入，由此可以作 PN 结的激光写入，也可以作 Ω 接触的直接写入。在这些应用中，激光微细加工的空间定域、“直接写入”能力以及较传统工艺的极大简化是该方法的基本特征。

沉积用的源材料应有足够高的纯度，因为它将直接影响沉积膜的纯度、形貌及物理性能。此外，源材料的分子还应有适中的键合强度。若键合太强，难以实现低温淀积。如键合太弱，会产生显著的热背景分解，导致不可控制的产生沉积物原子的暗速率。为避免这些现象的发生，最好选择那些能在紫外波段发生光分解的物质作为激光辅助沉积的源材料。

沉积物原子一旦产生，就可能同光分解的互补碎片发生碰撞复合，也可能同亲源气体或其他物质发生化学反应。一方面，这种光解碎片间的反应会增加沉积物原子的损失速率，对提高淀积速率不利；另一方面，它又可以抑制淀积物原子的空间扩散，使衬底表面的淀积能准确定域，对提高淀积图样的空间分辨率有利。在实际的淀积过程中，要善于根据实际需要和条件，利用其有益的一面，抑制其不利方面的消极影响。

沉积物原子入射到沉积表面时将发生吸附现象，入射原子吸附在入射表面的几率称为吸附系数。一般说来，衬底表面的吸附系数与新鲜沉积表面的吸附系数相差较多，这对提高沉积图样的空间分辨率有利。包括衬底表面的形貌、衬底温度在内的其他因素也能通过表面迁移率的改变而影响沉积膜的质量（纯度、晶粒大小等）及表面反应的空间范围。此外，在很多情形下，亲源材料的分子会在衬底表面形成相当厚的吸附膜。这种源分子吸附膜会改变沉积物原子在衬底表面的吸附系数，但这些源分子被光分解后可以直接在沉积表面提供沉积原子，对高分辨率图样膜的激光写入十分有利。

光化学分解沉积常用 UV 准分子激光器。CW Ar^+ 激光器也是常用的沉积光源，其分解机制多数为光热分解，也有光化学分解；CO_2 激光器的功输出率可以很高，但光子能量很小，虽然有些红外多光子吸收材料也能吸收多个 10.5 μm CO_2 激光光子，发生多光子光化学分解，但在实际应用中，10.5 μm CO_2 激光往往只用作高功率密度的热源，所诱导的淀积多属光热分解型淀积。这里要指出的是，UV 准分子激光的输出功率相当高，单光子能量也大，因而在强键分子的光分解中颇具威力，在激光诱导淀积中应用很广。但准分子激光的光束质量较差，重复频率也比较低，使用时常伴有瞬时的表面加热，因而用准分子激光淀积分辨率很高的图样比较困难。

5.2.3 激光化学掺杂

掺杂是实现集成电路、半导体器件、光电混合集成回路

和半导体光电子器件纵向结构的重要手段。要获得满意的器件参数和功能，必须将某些杂质以一定的方式掺入半导体基片的特定区域内，而且要在合适的掺入深度内，掺入必要的剂量，并满足一定的杂质浓度分布要求。常规的掺入方法有热扩散、离子注入、合金、中子嬗变、反冲注入等掺杂技术。

（1）激光化学掺杂的特点及分类

与常规的掺杂技术相比，激光化学掺杂有以下几个独特的优点。

1）由于强聚焦的激光束对基片表面的加热可以高度定域，时间可以很短，因此可以获得杂质浓度超过固溶度、具有变化很陡的杂质浓度分布的超浅结。

2）准分子脉肿激光可以使衬底表面瞬时熔融，在多晶硅掺杂中能防止杂质晶粒间界隙扩散，因而可以形成平滑的结面。

3）通过光脉冲能量和光脉冲数目的控制，可以实现结深和掺杂浓度的精确控制。

4）利用计算机控制的聚焦激光扫描，可以实现无掩模板的“直接写入”图形掺杂，将常规工艺需要多步加工才能完成的掺杂过程由激光“直接写入”一步完成。

5）掺杂图样可以具有很高的空间分辨率。出于杂质源的热分解速率、热扩散系数与温度呈非线性关系，掺杂线宽可以比激光束的焦斑直径小得多，用大于 2 μm 的束斑，可以获得 0.3 μm 的掺杂线宽。

激光掺杂的分类有不同的标准。按所用激光的波长成分来分，激光掺杂分为单波长法和双波长法。单波长法使用单波长的激光束作激光掺杂，它以光热分解或光化学分解的方式使源物质分解产生杂质原子，同时又对衬底定域加热，使杂质原子得以掺入。双波长法是同时使用两束不同波长的激光实现激光化学掺杂。较短波长的激光常以化学分解的方式使源物质分解产生杂质原子，其强度决定掺入衬底的杂质浓度；波长较长的激光起加热衬底表面的作用，以控制掺杂范围。双波长法可以用两束激光分别控制掺杂浓度和掺杂范围，单波长法没有色差、对准等问题，光路调整方便。

按掺杂所用杂质源来分，激光掺杂可以分为气相激光掺杂和固态杂质源激光掺杂。气相激光掺杂所用的源物质都是气态物质，通常是由吸附在衬底表面或碰撞在衬底表面的源气体分子发生光热分解产生杂质原子。固态杂质源激光掺杂通常是使用源物质的溶液在衬底表面制备固态掺杂膜，掺杂膜作为扩散源，在激光束照射时以光化学分解或光热分解的方式分解产生杂质原子。气相激光掺杂的应用范围广，但设备复杂、工艺要求高，源材料的贮存、运输、使用也相对困难一些。固态杂质源的激光掺杂对工艺条件要求较低，所需设备简单，源材料的贮运也方便，但适于作激光掺杂的源材料不像气相源材料那么多，因而使用范围有限。

按掺杂时衬底掺杂区的物相分，激光掺杂还可以分为液态掺杂和固态掺杂。所谓液态掺杂，是指掺杂时，衬底的掺杂区呈短时熔融状态。在固态掺杂中，衬底掺杂区始终呈固体状态。液态掺杂速率很快，掺杂浓度可以很高，可以超过固熔度，杂质浓度深度可以很大，但所需温度高，某些半导体材料尤其是光电子器件使用的 HgCdTe、InP 等化合物半导体不宜作液态掺杂。固态掺杂的温度较低，而且掺杂图样的空间分辨率可以很高。

（2）激光化学掺杂的光源

激光化学掺杂主要利用了激光束功率密度高、输出功率和脉冲重复频率易于控制、可强聚焦等优点。在掺杂过程中，激光束起两个作用：一部分激光能量用于源物质的光热分解或光化学分解，使之释放出杂质原子；另一部分激光能由衬底吸收，使衬底的表面层温度升高，甚至转变为熔融状态，使光分解生成的掺杂原子通过固相扩散或液相扩散进入衬底。

CW Ar^+ 激光器和准分子激光器是激光化学掺杂中最常用的两类光源。Ar^+ 激光器易于聚焦，适合于无掩模的直接写入图形掺杂，但其辐射波长在可见光区，光子能量较小，只能通过激发源物质分子到高能态再分解（实际上就是所谓的双光子分解或多光子分解），或者通过加热衬底表面使源物质发生光热分解。准分子激光器能发射光子能量较大的紫外光，因而光子可直接打破源物质分子的化学键而使之发生光化学分解。由于这种激光器具有很高的脉冲能量和相当高的重复频率，所以适合于大面积掺杂。

（3）工艺和装置

气态杂质源激光掺杂和气相激光沉积的工艺过程和主要装置都很相似，都需要真空处理，都需要反应室及相应的贮气设备及抽送气系统等。正因为如此，本章对有关具体的工艺过程及装置将不再赘述。这里要提请注意的是，两者毕竟是不同的处理工艺，在本质上当然存在诸多差异。首先，在激光掺杂中，无论掺杂原子是来自光热分解还是光化学分解，激光束都必须加热衬底表面，使其温度足够高，否则，掺杂速度会太慢。气相光沉积就不一样，如果属光化学分解沉积，衬底可以保持在相当低的温度，甚至可以在室温或更低的温度。此外，激光掺杂中人们注意的是结深 X_j、薄层电阻、掺杂浓度分布等参数，掺杂过程中实时监控的是这些参数或与这些参数相关的物理量，对掺杂样品的分析也同样是着重于这些参数及其相关的物理量。气相激光沉积中人们关注的是沉积膜的厚度、杂质含量、附着强度等，这自然使激光掺杂和激光沉积所用的在线测控设备及样品分析设备都大不一样。

固态杂质源激光掺杂与固相激光沉积也存在类似的情况，两者的薄膜制备、烘干、曝光、残余膜的清除等工艺程序和设备十分相似，而在测控、分析的设备和方法等方面也互不相同。以光源为例，固相激光沉积只需一个波长的激光，能使源物质光分解生成沉积原子即可；固态杂质源激光掺杂则可用两个波长的激光，分别决定掺杂浓度和掺杂区域。

在微电子器件的研制中，常需将磷掺入 P 型 Si 衬底。Si 衬底中作磷掺杂的源材料可以用 PF_5、PCl_3，光源可以用 XeCl（$\lambda \approx 308$ nm）、ArF（$\lambda \approx 193$ nm）准分子激光器。

以 193nmArF 激光做光源，PF_5 做掺杂源时，由于 PF_5 对 193 nm 激光的吸收很弱，掺杂磷原子只由 Si 表面吸附的 PP_5 分子的光热分解产生，光化学分解对掺杂原子的贡献可以忽略。在源气压较低时，主要由衬底表面化学吸附的 PF_5 层通过光热分解提供掺杂磷原子；在源气压较高时，衬底表面物理吸附的 PP_5 分子才提供较多的掺杂原子。

激光掺杂通常在不锈钢反应室中进行，先将反应室抽真空到 0.75×10^{-5} mmHg，再注入源气体。激光脉冲持续时间 20 ~ 40 ns，重复频率每秒几次到几十次。光斑强度应尽可能均匀，一般应使其中心区域的空间均匀性在均方根差 3% 的水平。光脉冲的激光能量密度一般在 10^{-1} J/cm² 数量级。

掺杂衬底为 P 型 Si 片。因 Si 表面通常附着有一层天然氧化物，应使用 10:1 去离子水的 HF 浸泡，再以去离子水清洗，除去其天然氧化物，然后立即送进掺杂反应室。

5.2.4　固态激光扩散

HgCdTe、GaAs、InP 等化合物半导体都不能经受高温冲击，只宜在较低温度作固态掺杂。由于掺杂图样空间分辨率的特殊要求，有时也进行 Si 衬底的固态激光掺杂。

作为 1.3 ~ 1.5 μm 长波长激光器的衬底材料，InP 是一种对光纤通信有极大意义的化合物半导体。Zn 在 InP 中的扩散系数较大，结深难于准确控制，Cd 在 InP 中的扩散较慢—

些，易于控制结深，因此研究 Cd 在 InP 中的扩散是一件很有意义的事。

在低压环境，液态 InP 容易遭受严重不平衡的影响，磷可能会蒸发，引起严重的表面损伤，因此，对于 InP，一般不作液态扩散，而在较低的温度下作固态扩散。

利用激光固态扩散技术，既可以做成 InP 衬底的欧姆接触，也可以做成 PN 结。

掺杂源为 Cd $(CH_5)_2$。在紫外光作用下，Cd $(CH_5)_2$ 会发生光化学分解而生成高纯度的原子 Cd，Cd 原子即作为掺杂原子，扩散进入 InP。

因为 InP 衬底不允许过高的温度，激光掺杂时其表面温度一般控制在 700℃以下。在较低的温度，源物质的热分解比较困难，故掺杂原子的生成机制多为源物质的紫外光化学分解。为将衬底表面的加热和掺杂原子的生成分开来控制，可采用双波长法，即同时使用两束不同波长的激光实现激光掺杂，用较短波长的激光分解源气体产生掺杂原子，控制掺入衬底的杂质浓度；另一束波长较长的激光起加热衬底表面的作用，控制掺杂范围。常用的方法是让 514 nmCW Ar^+ 激光通过温度相位匹配的倍额晶体（比如 ADP），然后让两种波长的光同时投射到衬底表面，功率较大的基频可见光（514 nm）直接加热掺杂区的衬底表面，功率较小的倍频光（257 nm）分解衬底表面的金属有机化合物 Cd $(CH_5)_2$，产生掺杂原子 Cd。用适当的方法，可以调节两种波长的光的强度，从而独立地控制衬底表面掺杂区的温度和掺杂 Cd 原子的流量。

掺杂样品的表面形貌决定于 514 nm 基频光的功率密度。激光较强时，掺杂区温度较高，由于材料的再蒸发，表面可能出现粒状的 Cd 淀积，表面形貌显得较差。

用扫描激光作直接写入图形掺杂时，掺杂图样的最小线宽也直接决定于 514 nm 基频光的强度和聚焦状况。用较低的光功率密度和较小的聚焦光斑，掺杂图样的最小线宽可以小至 1 μm 左右。光功率密度过高时，将出现衬底表面层的磷损失，影响器件质量，严重时甚至会出现 InP 表面的龟裂。显然，掺杂表面上基频光功率密度的准确控制，对 InP 衬底中 Cd 的固态激光掺杂至关重要。

掺杂浓度决定于 UV 激光强度、扫描速度和 Cd $(CH_5)_2$ 压力等参数。Cd $(CH_5)_2$ 气压在 1～5 mmHg 范围内变化时，掺入 Cd 的浓度与 Cd $(CH_5)_2$ 气压成线性关系。杂质浓度在一定范围内正比于倍频光的曝光时间，所以扫描速度越慢、掺入 Cd 的浓度越高。在其他参数相同的条件下，掺入杂质的浓度与倍频光的强度也呈线性关系，257 nm 紫外光越强，Cd 浓度越高。

因为是固态扩散，可能获得的最高掺杂浓度必然受限于 Cd 在 InP 中的固溶度，所以不可能得到液态掺杂那样高的杂质浓度。

5.2.5 激光退火

激光退火技术也是激光技术在半导体微细加工领域中的重要应用、在理论和应用方面的研究都很活跃。所谓激光退火，就是用功率密度很高的激光束照射半导体表面，使其损伤区（如离子注入掺杂或中子嬗变掺杂时造成的损伤）达列合适的温度，从而实现消除损伤的目的。激光退火分为脉冲激光退火和 CW 激光退火两种。

（1）概述

常规的热退火可以消除晶体中的一些缺陷，满足一般的要求，但存在较大的缺点。首先是热退火消除缺陷不完全。经热退火后遗留的二次缺陷对半导体的电特性影响仍然很大，例如：虽然热退火后迁移率可以恢复，但少数载流子扩散长度并不能恢复。其次，热退火后，许多注入杂质的电激活率不够高。即使将退火温度提到相当高的水平（例如对于 Si，温度高于 1 100℃），仍然能观察到大量的残余缺陷。因此，随着微电子、光电子器件向高性能方向发展，热退火越来越难以满足一些高品质器件的特殊要求。作为一种具有独特优点的新型退火方法，激光退火在这种技术发展的客观需求中应运而生。

1）激光退火的机理　激光束照射半导体材料时，一部分辐射能将被吸收，使半导体中价带电子激发到导带，分别在导带和价带中产生热电子和热空穴。经过与晶格多次碰撞，它们会把能量传递给晶格而转变成热。电子－晶格的弛豫时间为皮秒数量级（10^{-12} s），而激光退火中所用的光辐射持续时间一般大于纳秒数量级（10^{-9} s），这意味着在激光照射时间内，半导体吸收光子的瞬间就立即转变成热，迅速地建立起热平衡，升温速度极快，一般可以达到 10^9～10^{11} ℃/s。另一方面，光子还可以把能量直接传递给晶格振动，或者为杂质所吸收，使束缚在杂质能级上的电子或空穴分别跃迁到导带和价带上。此时，自由载流子还会进一步吸收光子在带内跃迁，当它们与晶格相互作用时，会发生能量转换而产生热。在激光照射结束后，激光在固体表面产生的热量迅速地由高温区传到低温区，冷却速度极快，可以达到 10^9～10^{14} ℃/s。这样，当激光束照射半导体材料时，在照射区将产生温度随时间的变化率很大、持续时间很短的骤冷、骤热过程。将该温度骤变过程控制在合适的变化范围，就可能使半导体性能得以改善，缺陷、损伤得以消除。这也就是所谓激光退火。

激光退火的机理还不十分清楚，有待进一步研究，但人们一般认为激光退火有以下两种模型。

① 脉冲激光退火的液相外延生长　当半导体材料受到宽度为 10～200 ns 的脉冲激光照射时，其表面吸收层的温度骤然升高，如果激光功率密度足够大，表面吸收层就能达到熔点而变成熔融状态。在脉冲结束时，固－液界面快速移动，产生液相外延再结晶。外延生长速率很高，可以达到 1～2 m/s，掺杂原子在外延过程中会迅速进入晶格成为替位原子，以致使超过热平衡固溶度的掺杂原子来不及析出而被“溶解”在晶格中，因而可以得到超过固溶度极高的高掺杂浓度。

② 连续扫描激光退火的固相外延再生长　当采用辐射持续时间为毫秒数量级的激光连续扫描照射半导体材料时，只要控制激光功率密度和扫描速度处于合适的范围内，即使半导体材料表面吸收层温度保持在熔点以下，也能得到满意的退火效果。在这种情况下，激光退火与热退火的机制相似，为固相外延再结晶过程。由于扫描持续时间要比脉冲宽度大几个数量级，如果温度高到使样品表面变成熔融状态的水平，将引起材料表面气化，这对半导体器件是很不利的。因此，连续扫描激光退火中应保持在固相外延状态。

2）激光退火的特点　与热退火相比，激光退火具有以下特点。

① 激光退火操作简便，可以在空气环境中进行，不需要真空系统，与超大规模集成线路（VLSI）工艺兼容性大。

② 激光退火的时间极短，表面层不易玷污，而且易于获得高浓度的浅掺杂层。由于 VLSI 集成度的不断提高，在减小器件横向尺寸的同时，也需要相应地减小其纵向尺寸。激光退火适合于超浅结工艺加工，正好满足了这一要求。

③ 对表面加热可以高度定域。激光退火不像热退火过程那样，使整个片子都处于相当高的退火温度，而是只有退火相关区域才受到高温冲击，其余区域都可以处于低温甚至室温状态。因此，激光退火不会使片子产生热变形，这会提高 VLSI 的成品率。

④ 可以提高器件性能。激光退火可以使掺杂浓度超过固溶度，可以做成超浅结，还可以使掺杂原子的电激活率近



于 100%，这些都对器件性能的改进大有好处。

⑤ 可以提高集成密度、成品率和可靠性。如果采用微米甚至亚微米焦斑直径的激光束扫描，实现计算机控制的定域退火，就可以更加精密、灵活地达到微电子和光电子器件制造的严格要求，使集成密度和器件性能都得以提高。

(2) 衬底中离子注入层的激光退火

一些研究已经指出，用离子注入技术来制作一些半导体器件，从潜在的竞争实力来看，在经济上完全可能与常规的扩散工艺相匹敌。但离子注入技术仍然存在一些问题。其最大的困难在于离子注入过程中产生的晶格损伤必须消除。尤其是比较重的分子的离子，常常产生很强的辐射损伤，严重的甚至会导致离子轰击区的完全非结晶化。这种严重损伤更在必须消除之列。此外，常规的退火工艺不仅速度很慢，而且对缺陷的消除也不尽人意，常常只能使受损伤的晶格部分恢复有序。这自然会影响器件性能。虽然有多步退火的方法可以消除缺陷，提高器件性能，但过程太复杂，退火速度很慢。此外，把整个基片都置于高温炉中作退火处理，还可能掺入有害的杂质，甚至引起各种各样的缺陷。脉冲激光退火的时间极短，而且除退火相关区域之外，基片其余区域都可以处于环境温度，不会受到高温冲击，因而可以避免上述种种问题。脉冲激光退火的光源可以用调 Q 红宝石激光器或 Nd:YAG 激光器，其波长分别为 0.597 μm 和 1.05 μm。

1) 离子注入多晶硅的激光退火　在制作同质结薄膜多晶硅器件时，必须有可靠的技术去控制结形成期间的杂质扩散。如果用常规工艺，整个基片都较长使其其处于高温状态，杂质就会沿晶粒间的间隙向深处扩散，这种现象当然应尽可能避免。用脉冲激光对注入离子的薄膜多晶 Si 进行激光退火，可以按要求精确控制杂质扩散。

表 5.1-23　离子注入激光退火的多晶 Si 特性参数

样品	退火前晶粒尺寸 /μm	能量密度 /J·cm^{-2}	退火后晶粒尺寸 /μm	载流子浓度 $n/10^5$ cm^{-3}	迁移率 μ/cm^2·(V·s)$^{-1}$	薄层电阻 R_s/Ω
1	0.02	0.45	0.5	1.0	15	38
2	0.02	0.88	1.5	1.1	20	28
3	0.02	1.17	—	1.1	17	32
4	25	0.55	—	0.45	21	54
5	25	0.88	—	1.1	25	22

表 5.1-23 列出了几个 B 离子注入调 Q 红宝石脉冲激光退火的多晶硅样品的载流子浓度 n、迁移率 μ 和薄层电阻 R_s 等性能参数。从表中可以看出，脉冲激光能量密度为 0.45 J/cm^2 时，1 μm 厚的小晶粒样品即已几乎完全恢复电激活，而在这一能量密度，熔融层厚仅约 120 nm。

2) Si 衬底中热扩散缺陷的激光退火　常规热扩散中产生的缺陷，也可以用激光退火使之消除。

在作高温扩散的时候常常会以沉淀物的形式，在近表层积聚高浓度的电钝化的掺杂原子，这就是所谓的"死层"，其载流子的寿命非常短，对短波长光伏响应特别严重。用激光退火的方法，可以使该"死层"瞬间熔融，使其中的掺杂原子得以激活，从而减少薄层电阻，改善 PN 结特性。

在激光退火前，在样品的近表层，B 浓度可以高达 10^{22} cm^{-3}，这也就是所谓的"死层"、激光退火以后，杂质分布大不一样，"死层"消失了，杂质原子重新分布到较深层的晶体中去。当然，PN 结特性也会有相应的改善，在 0.2～0.5 V 正偏压范围内，PN 结的理想因子开始下降，这些结果说明在衬底近表层由工艺过程中引入的缺陷可以用激光退火的简单方法清除掉。此外，由于掺杂浓度可以超过平衡溶解度，薄层电阻可以相应降低，这在一些半导体器件的研制中有明显的应用价值。

5.3　激光刻蚀

在半导体微细加工技术中，激光刻蚀已引起普遍关注，这种刻蚀工艺不仅可以降低对衬底材料的损伤，提高图形分辨率，还能够方便地实现选择刻蚀或定向刻蚀。就其方式而言，激光刻蚀主要可分为诱导和直接刻蚀。激光诱导刻蚀是在某种诱导气体的辅助下进行的，其基本光化学过程与激光诱导掺杂类似，包括激光作用下活性物质的生成及其与衬底的相互作用等联合过程。激光直接刻蚀通常是一个光解剥离 (APD) 过程。在高能量紫外光子的作用下，材料的化学键发生断裂，生成物所占据的体积迅速膨胀，最后以体爆炸的形式脱离母体。气相诱导刻蚀适用于各种半导体、金属以及介质等材料，工艺比较成熟。光解剥离刻蚀目前一般仅限于有机高分子聚合物材料。最近，对半导体材料的光解剥离也已开展研究。

5.3.1　激光诱导刻蚀

激光诱导刻蚀是将辅助气体导入置有被刻蚀材料的反应室中，激光从窗口射入，依靠由激光能量产生的活性物质与被刻蚀材料的反应进行刻蚀。激光诱导刻蚀的全过程可分为若干基本过程，如图 5.1-83 所示，首先是诱导气体吸收光子生成活性物质，这个过程包括光感应、光致电离及光分解。生成的活性物质通过化学反应、扩散和去激活等方式与反应气体分子相互作用。同时气体分子或活性物质还将通过物理吸附或化学吸附与固体表面进行反应。另一方面，固体表面在激光的辐照下，将发生电子感应或热效应，进一步增强吸附层及其与固体表面的相互作用，从而完成对材料的刻蚀。

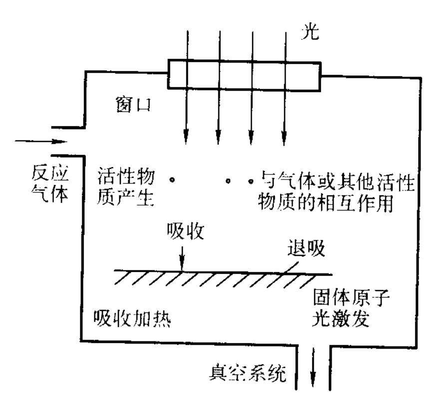


图 5.1-83　激光诱导刻蚀过程示意

诱导气体分子吸收光子后，其分解过程可分为二种类型。在光子能量较小时，将主要引发气体分子之间的振动，并经预离解状态后分解。若光子能量较高，则导致电子能级之间的跃迁，使气体分子不仅达到激发态，而且可直接电离或分解。激光与诱导气体分子的主要反应如表 5.1-24 所示。其中 A、B 表示原子，AB 表示分子，e 为电子，hv 为光子，

KE表示动能。正离子与激发态分别用上角标号+与*表示。究竟发生哪一种反应，由反应气体的种类和激光的能量决定。

表 5.1-24 光与气体的相互作用过程

$A+h\nu\rightarrow A^*$	原子激发
$A+h\nu\rightarrow A^++e^-+KE$	原子光子分解
$A+h\nu\rightarrow A^*\rightarrow A^++e^-+KE$	自电离
$AB+h\nu\rightarrow AB^*$	分子激发
$AB+h\nu\rightarrow A+B+KE$	分子分解
$AB+h\nu\rightarrow A^*+B+KE$	分子分解
$AB+h\nu\rightarrow A+B^*+KE$	分子分解
$AB+h\nu\rightarrow A^*+B^*+KE$	分子分解
$AB+h\nu\rightarrow AB^*\rightarrow A+B+KE$	预电离
$AB+h\nu\rightarrow AB^++e^-+KE$	分子光致电离
$AB+h\nu\rightarrow AB^*\rightarrow AB^++e^-+KE$	预电离

对于波长较长的激光，虽然光子能量较小，但如果增加辐照光子密度，将出现显著的多光子吸收，从而也能引起气体的光分解。例如，利用CO_2（$\lambda=10.5\ \mu m$）激光在SF_5诱导气氛中刻蚀单晶Si，当激光能量密度为1 J/cm^{2}时，SF_5首先吸收3～4个红外光子进入激发态：

$$SF_5+(3\sim4)\ h\nu\longrightarrow SF_5^*$$

然后，通过与Si表面的各种吸附作用，生成Si的氧化物：

$$SF_5^*:Si_{(吸附)}\longrightarrow SiF_2+SF_4$$
$$SF_5^*+SiF_2\longrightarrow SiF_4+SF_4$$
$$SF_4:Si_{(吸附)}\longrightarrow SF_4$$

这一反应的主要活性物质是SF_5^*，但仅在样品极近表面处的SF_5^*对刻蚀有效。这是由于远离表面处生成的SF_5^*在到达样品表面之前，将与气体分子相互作用而耗尽，故在这一激光能量密度下的刻蚀并不很有效。如果将激光能量提高到几个焦耳/平方厘米，则在SF_5可以吸收30个以上的光子而分解，生成F原子作为活性物质。与SF_5^*相比，F原子可以通过10倍以上的距离而不消失，印象刻蚀将十分有效。另一方面，采用不同的诱导气体时，可以改变多光子激发的阈值能量密度。对于CO_2激光，SF_5多光子吸收所需的脉冲激光能量密度超过数百毫焦/厘米^2，而采用S_2F_{10}作为诱导气体时，仅10 mJ/cm^{2}的能量密度便可导致分子激发。

诱导气体分子、激光激发生成的活性物质以及反应生成物等通常吸附在固体表面。其中有起因于诸如范德瓦耳斯力的物理性的力。前者称为物理吸附，后者称为化学吸附。固体表面的吸附性质在激光的电激发或振动激发下，促进了其活化性和活性物质与固体表面原子的反应，并将导致化合键断裂，使生成物剥离。同时，固体表面在激光的直接辐照下，将引起电子跃迁，生成电子－空穴对，并产生热效应，进一步增强了活性物质与固体表面的反应。

综上所述，激光诱导刻蚀过程主要包括气体分子分解及其与表面的反应。对于不同的刻蚀材料及不同的诱导气体和激光光源，其刻蚀机理可以光化学为主或热效应为主。

5.3.2 激光直接刻蚀

除诱导刻蚀外，利用短脉冲紫外激光还可以对材料实现直接刻蚀，尤其对有机高分子聚合物，可以获得非常整齐的刻蚀边缘。一般说来，这种直接刻蚀过程将不同程度地存在对样品的熔化或损伤，特别是采用可见至红外波段的激光时。激光直接刻蚀至少含有两个过程，即光化学过程与热过程，这涉及到激光与物质相互作用的本质。对于有机高分子聚合物，分子吸收紫外光子后，将引起电子向高能级的跃迁。如果跃迁高于聚合物的分解极限，则导致分子的分解。否则，跃迁电子将经历某些中间状态返回，最后重新终止于基态。在前一过程中，尽管也有可能使分子分解，但大多数能量来自于光子转换成热的效应，一般无化学反应。

紫外激光直接刻蚀材料通常包括单光子的光化学分解和热分解过程。对于可见光或红外光，虽然也可以直接刻蚀材料，但单光子能量不足以使分子键断裂，因而长波长光子被吸收后，将经由低能电子态直接或间接地转换成分子的振动模式，基本上是一个热过程，并伴有明显的样品熔化和热损伤。

5.3.3 刻蚀性质与特点

激光刻蚀，尤其是准分子激光刻蚀，可广泛应用于半导体、金属、氧化物介质膜和有机高分子聚合物材料。其中前三种材料适合于气相诱导刻蚀，工艺比较成熟。对于不同的材料，刻蚀速率和质量不仅与诱导气体种类和激光波长直接有关，还取决于诱导气体的压力、激光能量密度乃至辐照方式等参量，因为不同的参数可能导致刻蚀机理的不同。在适当的条件下，诱导刻蚀可以获得非常满意的结果。对于有机高分子聚合物，例如各种聚酯膜和光刻胶等，则非常适合于APD直接刻蚀，但这一工艺要求采用短波长紫外激光，否则热效应将影响刻蚀质量。无论气相诱导刻蚀还是APD直接刻蚀，均属干法刻蚀工艺，较之湿法刻蚀工艺具有十分显著的诱导，对提高刻蚀图形的精度非常有力，是半导体微细加工工艺的重要发展方向之一。

5.3.4 刻蚀工艺与技术

激光刻蚀的质量与刻蚀过程中各项参数，如激光的能量密度、波长，诱导气体的种类、压力以及被刻蚀材料的性质和温度等密切相关。为了满足刻蚀过程中的基本条件，必须选择适当的系统配置，并能方便地控制与刻蚀过程中有关的各项参数。在半导体技术中，激光刻蚀的主要目的是在被刻蚀材料上形成一定的图形，通常可以采用掩模刻蚀实现。由于激光诱导刻蚀具有良好的选择性，故还可以利用聚焦的激光束在衬底材料上直接描绘刻蚀所需的图形，或者用投影的方式将图形成像于衬底上，虽然激光是不带电的中性粒子，其辐射损伤比带电粒子小，但某些情况下仍需要考虑。

1）基本系统　用于激光气相诱导刻蚀的基本系统配置主要包括激光器，光学系统，反应室及其驱动系统，气体供给系统，真空系统，检测装置以及参数控制系统等。其中反应室是进行刻蚀反应的核心部分。此外，为了对反应条件或结果实现监控，通常还需要各种检测装置。完整的激光诱导刻蚀系统示意框图如图5.1-84所示。

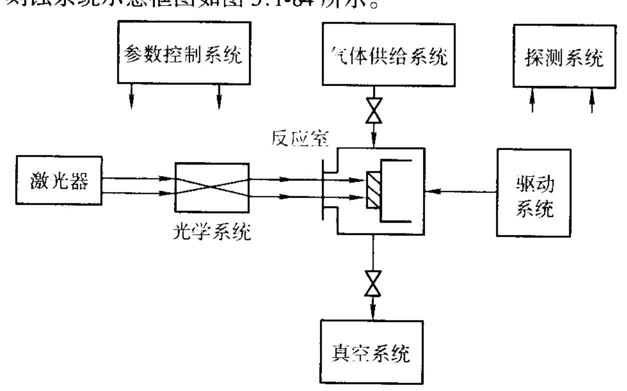


图 5.1-84 激光诱导刻蚀系统框图

2）刻蚀极限与损伤　在超大规模集成电路制备工艺中，图形的刻蚀精度与被刻蚀材料的损伤是一个非常重要的问



题。对于激光刻蚀，其精度除了取决于激光束本身的特性，还将受到不同工艺条件下刻蚀速率变化的限制。例如采用电子束刻蚀的 PMMA 作为模板，用 Hg 灯在 Cl 气体中刻蚀非掺杂 Si 时，掩模板的图形宽度对刻蚀速率有明显影响，如图 5.1-85 所示。当图形线宽大于 1 μm 时，一定时间的刻蚀深度基本上稳定在一个恒定值。但当图形线宽小于 1 μm 时，刻蚀深度随图形线宽的进一步降低迅速减小，并在 0.5 μm 的图形线宽附近降至稳定值的一半。因此继续减小图形线宽将使刻蚀变得十分困难。这一现象主要是由于在图形线宽较小时，辐照光的斜入射部分比例最大，有效的垂直辐照能量密度降低所造成的。

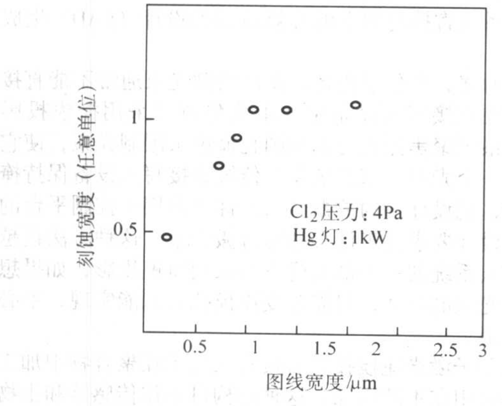


图 5.1-85　不同刻蚀线宽对刻蚀速率的影响

限制激光刻蚀精度的主要因素包括光的衍射、反射、入射、角度、热效应以及气体中活性物质供给和生成物排放速度等。在刻蚀图形线宽较小时，由于激光的衍射作用，使光强分布发生变化，对应光强较高的部分刻蚀速率增大，影响刻蚀的均匀性。而辐照光在刻蚀区域底部的平面漫反射或锥形反射，会引起线条侧面刻蚀加剧，使刻蚀范围增大。当入射光束与刻蚀平面并不完全垂直时，刻蚀图形底部的有效辐照强度与图形线宽和深度有关，较小的线宽与较大的深度均降低刻蚀速率。同时，倾斜入射光对线条侧面的刻蚀，也会引起图形线宽变大，影响刻蚀图形的精度。激光辐照引起的热效应还可能使被刻蚀的材料上的掩模层局部剥落，导致刻蚀质量变坏。

5.3.5　准分子激光的加工工艺

准分子激光器是发射紫外光的脉冲激光光源。这种光源的带宽相当宽，通常输出尺寸约为 25 mm × 10 mm 的矩形光束。光束的发散角一般为 1 ~ 5 mrad，并且在矩形光束的两个方向上的发散度是不同的。由于这种光束的发散度和不均匀性相当大，事实上光束的空间相干性相当差，所有准分子激光束的直接聚焦通常是不受人们重视的。因此在大多数应用中通常采用掩模投影技术。

（1）掩模投影

掩模投影方法具有极大的灵活性，在微细加工领域具有许多优越性，这些性能如下。

1）掩模尺寸　投影物镜把掩模图样缩小并投影到工件上，所有掩模上的图案特种尺寸不必像待加工公积金上的微细结构那么细小。一般投影物镜的缩小倍数为 4×、10× 或 30×，没有必要把掩模图案加工成具有超高分辨率的特种尺寸，这样就减少了掩模的复杂性和加工费用。

由于准分子激光器输出的光束是不均匀的，因此要采取某种形式的光束匀化处理以产生“平顶”能量分布光束。光束匀化处理是很重要的，因为在样品各点处的烧蚀深度与能量密度有关。把一个掩模放置在能使光束最均匀化的平面处，用于限定光束的形状或图样，再用分辨率相当高的光学系统把通过掩模的光束成像到样品上。

通常情况下，激光束在掩模投影系统中保持不动，而掩模和工件是移动的，并按照精确控制的运动方式穿过激光束。掩模投影的基本原理示于图 5.1-86。

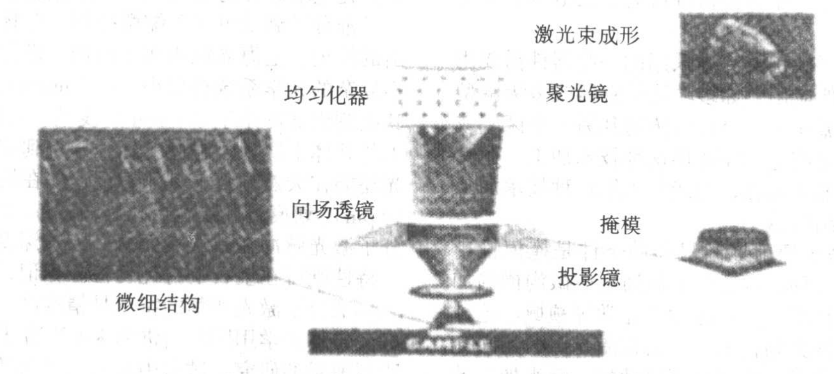


图 5.1-86　典型的准分子激光掩模投影系统

2）掩模损伤　由于使用缩微投影物镜，所以投到掩模上的激光能量密度比投到工件上的能量密度低。这样既减少了对掩模的损伤，又延长了掩模的使用寿命。

3）掩模与工件的分离　因为掩模和工件不是非常接近，所以掩模不会受到工件烧蚀时产生的碎片或散粒的损伤。

4）单独控制　掩模投影方法可以单独控制掩模和工件的运动，并可根据微细工程的要求采用许多不同的加工处理技术。

5）分辨率和焦深　掩模投影加工得到的最小特种尺寸或分辨率 R，基本上是由投影物镜的性能决定的。可用 $R\alpha k_1\lambda/NA$ 表达，其中 λ 是激光波长，NA 是光学系统的数值孔径，k_1 是一个与工件材料和加工条件有关的常数。

掩模投影系统为微细加工提供了极大的灵活性，用同一系统能加工出不同用途的各种类型的微细结构。

（2）各种微细结构的加工

在掩模投影系统中有些加工参数是可以调整的，适当控制这些参数能对微细加工的结构产生不同的影响。这些可调加工参数包括激光波长、光学系统设计参数、工件材料、激光能量和重复频率，但最重要的参数是激光照射期间掩模和工件的位置和运动参数，它能决定待加工的微细结构的类型。因此，对掩模和工件位置的精确控制，以及它们的运动和激光脉冲的精确同步，对微细结构的加工制作是至关重要的。

1）静止掩模和工件　典型投影物镜的像尺寸为几百微米至几毫米。因为投影图像比掩模要小数十倍，所以投在掩模上的激光束的尺寸为数十毫米。如果待加工的结构小且简单，或者是由规则的重复图案构成，而图案的一个基本“单元”能用激光束全部照明，则可以采用静止掩模投影技术进

行加工。这种技术的最普通应用是打孔，例如加工喷墨打印机的喷嘴，此外还可用于加工任何种类的离散型结构。

这种基本加工技术扩展了静止投影加工技术的适用性，从而可在两次微细结构加工之间横向移动工件：打开激光，采用静止掩模和工件加工出一种微细结构；关闭激光，沿 X 或 Y 方向横向移动工件；再次打开激光，然后在工件的不同位置处加工出同样的结构。重复这一加工过程，能在工件较大面积上排满这种加工结构。这种加工技术亦称为步进－重复加工技术。

此外，静止投影加工技术还可在两次微细结构加工之间转换新的掩模图样：打开激光，用静止掩模和工件加工出一种结构；关闭激光，横向移动掩模，把另一块掩模转换到激光束照射的位置处；再打开激光，在同一工件的相同位置处叠加上新的掩模加工图样。这种技术被称为转换位置掩模投影加工技术。

可认为这两种技术是静止掩模和工件投影技术的扩展，因为掩模和工件是在两步加工之间移动的。

步进－重复加工技术现已广泛应用于如喷墨打印机喷嘴的微孔加工。在这种情况下，整个喷头（含有几百个细孔）的孔可同时打出，然后同时移动到下一个位置再打。在喷嘴板材的工业加工中，工件通常是用聚酰亚胺带材料，激光加工系统自动地卷带并打孔，然后再卷带。

2）移动掩模　如果在激光照射期间移动掩模，则加工出来的结构断面具有深度变化，因此把深度信息引入工件的微细结构中。具体可用以下方法实现，打开激光，精确控制掩模移动穿过激光束，于是在静止的工件上激光照射的区域内曝光量是连续变化的，在工件上烧蚀出深度梯度图样。这种技术被称之为掩模刻划技术。

用这种技术可在聚合物上加工出简单的斜面。应把这种相对简单的结构加以完善，以适合各种不同的需要，加工出更复杂的图案。利用不同掩模孔径、掩模运动、工件定位和激光照射等参数精心组合，在聚合物材料上加工出多个斜面组合的复杂微细结构。

某些微光机电系统（MOEMS）中采用的一些器件需要用这种技术进行加工。其他应用，如多功能传感器或多级微型射流系统，通常要求把流体从一个区域传送到另一个区域或平面，又如控制流体的导槽等都需要用这种技术加工。尤其是许多其他微细结构，如喷嘴孔，也能并入用这种技术加工的斜面或倾斜通道微细结构当中。

3）移动工件　在激光照射期间只移动工件是掩模投影技术的最普通的应用，这种技术适合于微通道或微沟槽的加工，这些加工结构已广泛用于生物医学和光学等领域。这种技术通常也被称之为工件刻划技术，因为在激光照射期间掩模静止不动，而工件是在激光束照射下移动的。激光加工的各项条件，如激光能量和发射次数限定加工图案的深度，掩模的形状决定烧蚀结构截面深度的形状。因此，通道的二维平面形状可用工件的运动确定，它们的截面形状能用掩模的形状确定。因为这两个加工条件能独立选择，所以该技术能加工出各种微细结构。

4）移动掩模和工件　也可将这种技术称之为同步扫描技术，因为掩模和工件在激光加工期间是同步运动的。同步扫描技术用于制作大的和非重复性的图案，以及制作上述三种技术不能制作的图案。这种技术已经用于印刷工业、印刷线路板工业和显示平板，以及其他应用。

掩模和工件的运动（由于存在缩放比，所以它们的运动速度是不相等的）和激光的照射需要高度精密控制。如果待烧蚀图案要求均匀深度，则应考虑工件各处发射激光脉冲的次数应该相同。同步扫描技术的主要缺点是在掩模上必须包含被加工工件的整个图案，但前面所列的几种激光加工技术的优点它都具备。通常用同步扫描去保持微细加工样品的深度，但是在这种技术中另外一个变量也能使深度发生变换。这种技术被称之为同步重叠扫描技术，它利用工件刻划在同步扫描样品上增加深度信息。

（3）用掩模投影直接写入

直接写入技术通常使用 Nd:YAG 或 CO_2 激光器（它们具有良好的光束传输性能），加工时把激光束聚焦成一个小光点。利用激光束或者样品运动在样品上加工微细结构。

直接写入技术有两大优点是：

1）不需使用掩模；

2）加工路径可直接进入加工系统的控制部分（也就是说，激光系统直接与图案的计算机辅助设计（CAD）生成部分接口）。

如前所述，准分子激光器发出的激光束通常不能直接聚焦，但是在直接写入设备中要求聚焦可以采用掩模投影系统。这个系统聚焦光点是利用圆孔掩模来限制光束，使它在工件上呈一个光点。该系统作为传统直接写入设备保持掩模静止不动，把设计好的数据送入工件平台用于控制平台的运动，按照设计要求让工件移动穿过激光束。这种方法超越传统直接写入系统的一个最大优点是采用掩模投影，如果想要改变投影光斑的尺寸，只需改变掩模孔径就能实现，不必更换投影物镜。

用准分子激光掩模投影直接写入技术在聚合物中加工复杂结构的应用在不断增加，这种结构可用作传感器和生物医学器件。聚合物准分子激光加工的优点与直接写入等高路径的优点相结合，不用掩模限定图案。

5.3.6　准分子激光加工在微细加工中的应用

准分子激光可加工小于 0.1 mm 的孔，既可用于打通孔，也可用于打盲孔，且孔边缘清晰，精度高，对周围材料几乎没有什么影响。例如，日本三菱电气公司用 KrF 准分子激光在 200 μm 厚的工程塑料膜上试验，打出了深径比为 10 的孔，孔上端直径为 20 μm，下端直径为 8 μm。

准分子激光可用于缩微打标，在物品上打出肉眼分辨不出的标记。上海光机所在不锈钢上进行了打标试验，采用并不复杂的光学系统打出小至 0.2 mm×0.3 mm 的字，，还可在其上刻出宽度小于 0.1 mm 的线条。安徽光机所成功地在人工晶状体上实现了缩微打标，并得到实际应用。用准分子激光还能在天然钻石上刻印标记，如在钻石上刻出深度不超过 10 μm 的划痕，其线宽可达到 20 μm，线长为 25～50 μm。准分子激光脉冲在钻石表面每次穿透深度约为 0.1 μm，利用这一特性既可在宝石上打纯度检验标记，还可用来鉴定宝石。

准分子激光切割的特点是精度高，热影响小，切边质量好。吉林大学用国外引进的 KrF 准分子激光器进行了切割金刚石薄膜的研究。试验中最大刻蚀深度为 90 μm，刻蚀出的金刚石薄膜边缘齐整，不存在用 YAG 激光刻蚀时常出现的黑色炭末。日本一家制造航空发动机的公司研究了用 ArF 准分子激光切割纤维增强塑料，试验发现，随着能量密度的增加，材料的去除速率也增加，在能量密度较小时，一个脉冲可去除零点几微米；能量密度增大后，一个脉冲可去除 2～3 μm。在热影响方面，测得切割试样沿纤维方向从切边到基体热影响区的宽度不大于 5 μm，相当于切缝宽度的 1/50，切缝质量明显比 YAG 和 CO_2 激光切的好。

准分子激光在微电子制造业中的应用是推动此技术不断发展的重要动力，目前所报道的准分子激光加工的研究和应用大部分是关于这一方面的。微电子工业中使用的材料大部分对准分子激光有良好的吸收，多数可应用这种加工。

在半导体工业中，线路开发、疲劳分析和各种检验程度都日益需要对细、薄的金属线和导体进行切割，准分子激光加工技术的发展为二氧化硅、硅、砷化镓和高分子材料的超



薄切割提供了可能。美国XMR公司的研究人员用XeCl激光烧蚀微电子线路，用一个脉冲割断了一个4 μm宽、1 μm厚的多晶硅导体，下面的二氧化硅和单晶硅基体都没有被破坏。在国外，用准分子激光在印刷电路板的聚酰亚胺绝缘层上打微通孔已用于生产。

在微电子工业中，常用准分子激光进行去除薄膜等选择性加工。准分子激光可以从金属基底上除去高分子薄膜，蚀除介质材料的能量一般低于蚀除金属膜所需的能量。由于存在这种差别，就能从金属基底上去除聚合物膜、黏合剂或光刻胶，而不烧损金属基底。这种金属基底非常薄，完全经受不住普通红外激光照射所产生的热量。准分子激光还可从非金属基体上清除数微米厚的金属膜，但基体不受影响，可以认为大部分激光能量被金属膜吸收，导致局部熔化，部分能量穿透金属到了金属/基体的界面，产生了一种压力使熔化的金属迅速地被清除。

准分子激光在微电子工业中的另一个应用是剥线。在微电子工业中，经常要用直径为50 μm的漆包线连接微型电路，这种漆包线用有机聚合物或者塑料涂层作绝缘膜，用机械的方法无法刮除，而用准分子激光却可以完成这一工作。其机理是准分子激光对有机物质的消融作用。当有机物薄层吸收紫外光时，其分子长链的化学键被打破，产生的碎片即可挥发，从紫外光照射的地方消失，从而实现剥线。

准分子激光光刻是准分子激光在微电子行业中的典型应用之一。由于准分子激光的波长短，专用的窄线、宽器件用于光刻对光刻图样进入亚微米尺寸十分有利，在集成电路芯片上可刻出小于0.5 μm的微电子线路，这对于超大规模集成电路的发展意义很大。这类应用还有集成电路掩模制作、掩模修复以及印刷电路上直接写入或制做图样等。

编写：张永康（江苏大学）
段爱琴（北京航空制造工程研究所）
邹世坤（北京航空制造工程研究所）
周建忠（北京航空制造工程研究所）
左敦稳（北京航空制造工程研究所）

第2章　电子束加工技术

1　概述

1.1　电子束加工技术的发展

电子束作为高能量密度热源，早已为人们所注意。1949年，联邦德国的K.H.Steigerwald博士在0.5 mm厚的不锈钢薄板上，用电子束钻制出直径为0.2 mm的孔。1952年研制出加速电压为12.5 kV、功率为2.5 kW的电子束装置，并钻制出人造纤维喷丝板孔。1950年，电子束技术被成功地用于焊接。1957年，法国原子能委员会萨克莱核子研究中心的斯托尔研制成功世界上第一台用于生产的电子束焊接机。原来用氩弧焊焊接的原子反应堆燃料元件锆包套封口，废品率达30%，而采用电子束焊接后，所制产品全部合格。这一成果，显示出电子束加工的潜在前景，引起了各国的重视。1959年，联邦德国Zeiss公司研制出多种用途的电子束加工机，可以用来进行打孔、铣切和焊接；接着，又研制成功加工宝石轴承孔的电子束打孔机和加工化纤喷丝板的异形孔加工机等专用设备。同时，美、苏、日、英等国也相继开展了电子束加工技术的研究。20世纪60年代初，电子束打孔、铣切、焊接、镀膜、熔炼等技术，已成功地应用到原子能、航空、航天、电子和精密机械等部门中，促进了技术的发展。

从20世纪60年代开始，电子束加工技术又在新的领域内得到应用。其中一项新工艺即电子束曝光。随着微电子学的发展、集成度的提高，要突破常规光刻工艺所达到的最小线宽2 μm的极限，必须探索新的光刻工艺。受到扫描电镜高分辨率的启发，人们利用扫描电镜在光致抗蚀剂上进行曝光，终于得到了高分辨率的线条。目前可曝光出线宽为45 nm的单线条。

20世纪60年代中期，英国剑桥科学仪器公司的飞点扫描电子束曝光机研制成功，并作为商品投入市场。在1967年，首先由日本电子公司研制成JBX－2型扫描电子束曝光机。此后不久，美国和法国也先后研制成扫描电子束曝光机。

20世纪70年代，国外开始致力于扫描电子束曝光机在微电子器件生产线上实用化的研究，以提高微电子器件的生产效率和成品率。此外，还开始进行成形束和变形束扫描电子束曝光的研究。全部扫描电子束曝光机都是用计算机控制图形的制作，同时，扫描方式采用了矢量扫描，研制出了硼化镧（LaB_6）电子枪、场致发射电子枪，以进一步提高图形分辨率，并开展了敏感性高而且反差好的电致抗蚀剂的研究工作。目前，扫描电子束曝光技术在微电子学工艺中制作掩模或器件所能达到的最小线宽已小于0.5 μm。

70年代开始，前苏联（现乌克兰）巴顿焊接研究所开始了电子束物理气相沉积（EB－PVD）设备及工艺的研究。美国、德国也开展了这方面的研究。

电子束物理气相沉积设备功率一般在40～200 kW之间，加速电压20 kV左右。设备研究处于世界领先的是乌克兰巴顿焊接研究所，现已开发了实验室型、中试生产型以及批量生产用的系列产品，其实验室有十六台电子束物理气相沉积设备，该设备还出口到美国、欧洲、日本、中国等。

电子束物理气相沉积技术主要应用于飞机发动机的涡轮叶片热障涂层，涂层厚度最大可达300 μm，沉积涂层寿命大大高于等离子喷涂涂层寿命。

另外，电子束物理气相沉积还可用于结构涂层，例如叶片的冷却槽、激光反射镜的冷却槽等可采用这种方法加工出来。刀具、带材，医用手术刀、耳机保护膜、射线靶等均可用到电子束物理气相沉积方法。

电子束物理气相沉积技术除了用于制备涂层外，还可用于材料提纯、制造难加工的多种材料组成的叶盘拉拔带材（铝带）、钛丝，制造钛粉等。纳米材料的获得也可采用此种方法。

我国对电子束加工技术的研究始于1960年，最初是从电子束焊接和打孔着手。20世纪60年代初，先后研制成电子束焊接机、宝石轴承电子束打孔机以及人造纤维喷丝板电子束打孔机。当时用我国自行研制的电子束加工机制造的玻璃喷丝板，曾用于生产。

20世纪60年代中期，我国除研制和生产电子束焊接机外，还研制出多种电子束熔炉、区域熔炼炉、镀膜机等设备。

20世纪70年代以来，随着我国半导体技术的发展，又进行了电子束曝光技术的研究。曾先后研制出电子束布线机、扫描电子束曝光机、投影电子束曝光机、X射线曝光机，并研究了相应的工艺技术。近年来，我国又开展了半导体材料的电子束退火和金属材料的电子束热处理的研究。

1.2　电子束加工工艺

电子束加工技术的主要分类如图5.2-1所示。

电子束加工技术的应用范围很广，涉及到多种加工技术，但主要以热加工为主。

1）电子束精微加工　可高效率高质量地完成微细的打孔、切缝、刻槽等加工；还可通过电磁线圈对电子束的偏摆控制，完成曝光、雕刻等精密加工，这种设备一般都用计算机来控制，并且常为一机多用。

2）电子束焊接　与其他电子束加工设备不同之处在于，除高真空电子束焊机之外，还有低真空、非真空和局部真空等类型。

3）电子束镀膜　可蒸镀金属膜和介质膜。

4）电子束物理气相沉积　主要用于飞机发动机热端部件的热障涂层制备。

5）电子束熔炼　包括难熔金属的精炼，合金材料的制造以及超纯单晶体的拉制等。

6）电子束热处理　这是电子束技术的重要新应用。包括金属材料的局部热处理以及对离子注入后的半导体材料的退火等。

上述各种电子束加工总称为高能量密度电子束加工。高能量密度的电子束由电子枪产生。电子枪的阴极发射出电子，并会聚成电子束，在电子枪的加速电场（通常由15～175 kV的直流高压形成）作用下，电子被加速到接近或达到光速的一半，从而得到很高的动能。电子束再经电磁透镜的聚束作用，会聚成为更细的细束。束斑直径为数微米至一毫米，而在某些应用场合下，束斑直径可小至数十分之一微米，因此能量非常集中。电子束的功率密度（即单位时间内输入单位面积材料中的能量）可高达10^7 W/cm^2。当电子束轰击材料时，能量大部分转换成热能，使材料局部区域温度急剧上升熔化，甚至汽化而被除去，从而实现对材料的加工。

1.3　电子束加工的特点

与一般加工方法相比，电子束加工在许多方面具有显著特征（见表5.2-1）。



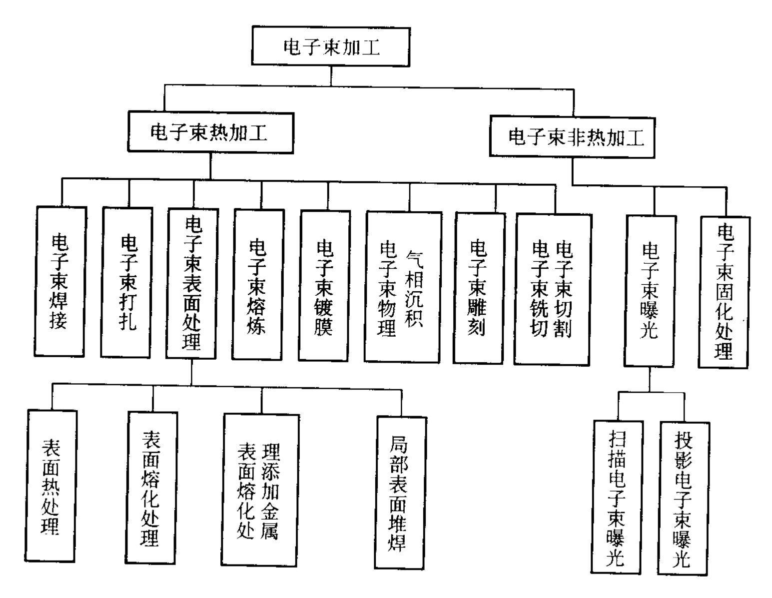


图 5.2-1　电子束加工技术的主要分类

表 5.2-1　电子束加工技术特点

特点	详细描述
能量高度集中，热输入量小	电子束的能量密度可达 $10^7 \sim 10^9$ W/cm^2，同时，电子束具有很高的能量转换效率，可将 90% 以上的电能转换成热能。在进行厚板焊接时，电子束焊接所需能量大约只有电弧焊接的 2%，可以实现高速焊接，深穿透焊接，对材料的热影响也相当小
束斑极小	电子束束斑直径可控制在几十分之一微米至 1 毫米，可用于精细加工，实现微米级线条曝光
加工效率高	厚度为 0.1～5 mm 的工件打孔只需十微秒至几十秒。由于速度很快，热量散失少，工件热变形小，电子束本身不产生机械力，无机械变形问题
可控性好	电子束能量和工作状态在电场和磁场的作用下均可方便而精确地调节和控制，位置控制精度能达到 0.1 μm 左右，与计算机、数控系统配套对电子束的能量和能量密度进行调节，很容易通过调节加速电压、电子束流和电子束的会聚状态来实现
污染小	电子束加工大多是在真空中进行，具有良好的保护作用，熔融材料不会被氧化和污染；电子束加工既不产生粉尘，也不排放有害气体和废液，对环境几乎不造成污染
设备复杂	投资较高、运行成本较低，需要维修人员具有很高的专业技术水平
防护困难	电子束加工会产生硬 X 射线，危害人体健康，必须进行安全可靠的防护

电子束加工的特点改变了许多产品原有的某些设计思想。例如，原来很多对精度要求很高的复杂或巨型零件，耗费工时，甚至无法整体加工。现在可以将其分为若干易于加工的单元，在完成全部精加工甚至热处理后，由电子束将其焊为整件。用扫描电子束退火技术制造摄像管硅靶的大面积二极管阵，无需掩模，缺陷可在退火过程中消除。这是一步完成的处理过程，无需复杂的对中和打定位标记，完全不同于原有工艺。

电子束加工目前不但已进入了各个加工领域，并已成为近代加工技术中迅速发展的独立学科。

2　电子束焊接

电子束焊接一般是指在真空环境下，利用会聚的高速电子流轰击工件接缝处所产生的热能，使被焊金属熔合的一种焊接方法。电子轰击工件时，动能转变为热能。电子束作为焊接热源有两个明显的特点。

1）功率密度高　电子束焊接时常用的加速电压范围为 30～150 kV。电子束电流为 20～1 000 mA。电子束焦点直径约为 0.1～1 mm。这样，电子束的功率密度可达 10^6 W/cm^2 以上，属于高能束流。

2）精确、快速的可控性　作为物质基本粒子的电子具有极小的质量（9.1×10^{-31} kg）和一定的负电荷（1.6×10^{-19} C），电子的荷质比高达 1.76×10^{11} C/kg，通过电场、磁场对电子束可作快速而精确的控制。电子束的这一特点明显地优于同为高能束流的激光，后者只能用透镜和反射镜控制，速度慢。

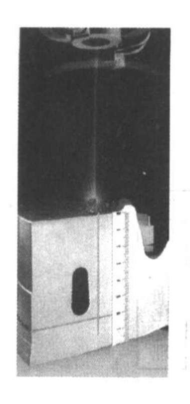
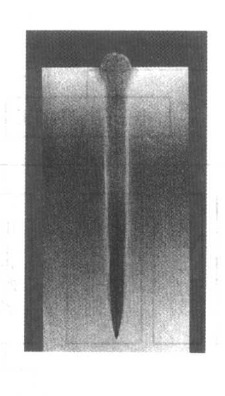
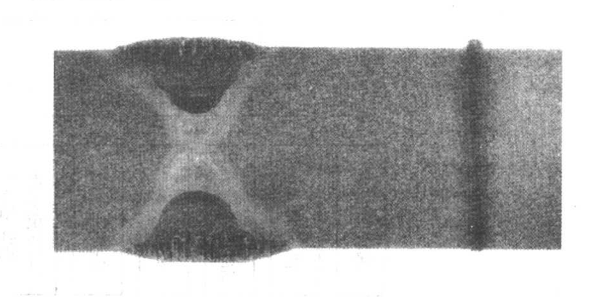
基于电子束的上述特点和焊接时的真空条件，真空电子束焊接具有下列主要优缺点。

优点如下。

1）电子束穿透能力强，焊缝深宽比大，可达到 50:1。图 5.2-2 所示的是电子束焊缝的特点。图 5.2-2a 是电子束焊接过程的示意图，上部是电子枪的出口，中部的亮带就是高速的电子流，下部是电子束焊接后在铝合金活塞上形成焊缝的截面金相照片。其标尺显示焊缝深度为 70 mm，而焊缝的宽度仅为 1 mm 左右，焊缝深宽比大。图 5.2-2b 是工程应用中常用的优质电子束接头焊缝形状的金相照片，焊缝自上到下宽度均匀，称“平行焊缝”。图 5.2-2c 是 25 mm 钢材等厚度电子束焊焊缝和开双面坡口的弧焊焊缝横断面对比的金相照片，电子束焊接时可以不开坡口实现单道大厚度焊接，比弧焊可以节省辅助材料和能源的消耗数十倍。

2）焊接速度快，热影响区小，焊接变形小。电子束焊接速度一般在 1 m/min 以上，由图 5.2-2b 可以看出，电子束焊缝热影响区很小，有时几乎不存在。焊接线能量小以及“平行焊缝”的特点使得电子束焊接的变形较小。因此，对于精加工的工件电子束焊可用作最后连接工序，焊后仍保持足够高的精度。

3）真空环境利于提高焊缝质量。真空电子束焊接不仅可以防止熔化金属受到氢、氧、氮等有害气体的污染，而且有利于焊缝金属的除气和净化，因而特别适于活泼金属的焊

(a) 电子束焊接过程的示意图　(b)电子束焊缝形状　(c)电子束焊缝与弧焊的比较

图 5.2-2　电子束焊缝的特点

接。也常用电子束焊接真空密封元件，焊后元件内部保持在真空状态。

4）焊接可达性好。电子束在真空中可以传到较远的位置上进行焊接，只要束流可达，就可以进行焊接。因而能够进行一般焊接方法的焊炬、电极等难以接近部位的焊接。

5）电子束易受控。通过控制电子束的偏移，可以实现复杂接缝的自动焊接。可以通过电子束扫描熔池来消除缺陷，提高接头质量。

缺点如下。

1）设备比较复杂，费用比较昂贵。

2）焊接前对接头加工、装配要求严格，以保证接头位置准确，间隙小而且均匀。

3）真空电子束焊接时，被焊工件尺寸和形状常常受到真空室的限制。

4）电子束易受杂散电磁场的干扰，影响焊接质量。

5）电子束焊接时产生的 X 射线需要严加防护以保证操作人员的健康和安全。

由于有上述的优势，电子束焊接技术可以焊接难熔合金和难焊材料，焊接深度大，焊缝性能好，焊接变形小，焊接精度高，并具有较高的生产率。因此，在核、航空、航天、汽车、压力容器以及工具制造等工业中得到了广泛的应用。

2.1　工作原理和分类

2.1.1　工作原理

电子束是从电子枪中产生的。通常电子是以热发射或场致发射的方式从发射体（阴极）逸出。在 25 ~ 300 kV 的加速电压的作用下，电子被加速到 0.3 ~ 0.7 倍的光速，具有一定的动能，经电子枪中静电透镜和电磁透镜的作用，电子会聚成功率密度很高的电子束。

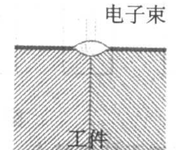
这种电子束撞击到工件表面，电子的动能就转变为热能，使金属迅速熔化和蒸发。在高压金属蒸气的的作用下熔化的金属被排开，电子束就能继续撞击深处的固态金属，很快在被焊工件上“钻”出一个锁形小孔（图 5.2-3）。小孔的周围被液态金属包围。随着电子束与工件的相对移动，液态金属沿小孔周围流向熔池后部，逐渐冷却、凝固形成了焊缝。也就是说，电子束焊接过程中的焊接熔池始终存在一个“匙孔”。“匙孔”的存在，从根本上改变了焊接熔池的传质、传热规律，由一般熔焊方法的热导焊转变为穿孔焊，这是包括激光焊、等离子焊在内的高能束流焊接的共同特点。

电子束传送到焊接接头的热量和其熔化金属的效果与束流强度、加速电压、焊接速度、电子束斑点质量以及被焊材料的性能等因素有密切的关系。

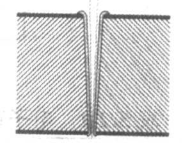
2.1.2　分类

电子束焊的分类方法很多。

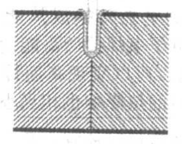
电子束



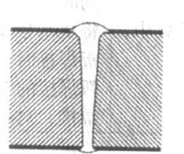
(a) 接头局部熔化、蒸发



(c) 电子束穿透工件，“匙孔”由液态金属包围



(b) 金属蒸气排开液体金属，电子束“钻入”母材，形成“匙孔”



(d) 焊缝凝固成形

图 5.2-3　电子束焊接焊缝成形的原理

按电子束加速电压高低可分为高压电子束焊接（100 kV 以上）、中压电子束焊接（60 ~ 100 kV）和低压电子束焊接（60 kV 以下）三类。工业领域常用的高压真空电子束焊机的加速电压为 150 kV，功率一般都小于 40 kW；中压真空电子束焊机的加速电压为 60 kV，功率一般都小于 75 kW。

按被焊工件所处的环境的真空度可分为三种：高真空电子束焊、低真空电子束焊和非真空电子束焊。

高真空电子束焊是在 10^{-4} ~ 10^{-1} Pa 的压强下进行的。良好的真空条件，可以保证对熔池的“保护”，防止金属元素的氧化和烧损，适用于活性金属、难熔金属和质量要求高的工件的焊接。

低真空电子束焊是在 10^{-1} ~ 10 Pa 的压强下进行的。从图 5.2-4 可知，压强为 4 Pa 时束流密度及其相应的功率密度的最大值与高真空的最大值相差很小。因此，低真空电子束焊也具有束流密度和功率密度高的特点。由于只需抽到低真空，适用于批量大的零件的焊接和在生产线上使用。例如，变速器组合齿轮多采用低真空电子束焊接。

在非真空电子束焊机中，电子束仍是在高真空条件下产生的，然后穿过一组光阑、气阻和若干级预真空小室，射到处于大气压力下的工件上，由图 5.2-4 可知，在压强增加到 15 Pa 时，由于散射，电子束功率密度明显下降。图 5.2-5 所示的是在氦气氛下电子束的散射情况，由于氦的密度小，在 500 Pa 时电子束仍发散较小，但随着气压的升高，发散逐渐增大。在空气条件下，电子束散射更加强烈。即使将电子枪的工作距离限制在 20 ~ 50 mm，焊缝深度也小于 60 mm，焊



缝深宽比最大也只能达到 5:1。

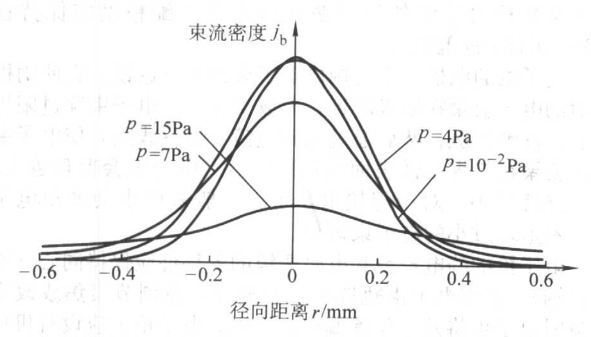
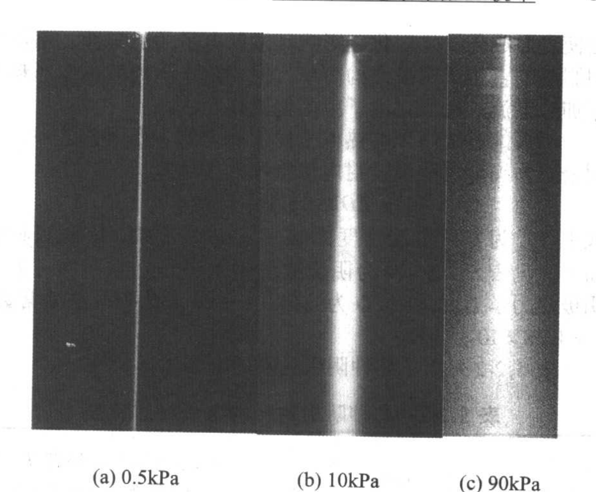


图 5.2-4　不同压强下电子束斑点束流密度 j_b 的分布

实验条件：U_b = 60 kV；I_b = 90 mA；z_b = 525 mm；

（z_b 为工作距离，即从电磁透镜中心平面到工件表面的距离）

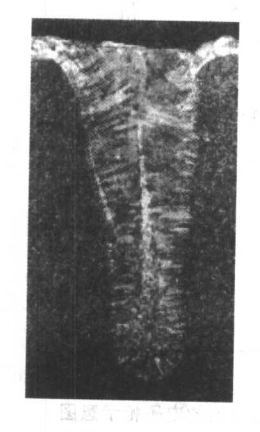
如图 5.2-6a 所示的铜合金焊接接头，采用 270 kV 的加速电压，60 kW 的功率，工作距离 20 mm，焊接深度仅为 29 mm，焊缝深宽比也较小。从图中可以看出非真空电子束焊接的接头特征。然而，在真空条件下，电子束焊接的深度大大提高，如图 5.2-6b 所示的 5083 铝合金真空电子束焊缝金相照片，其焊接深度达到 450 mm。



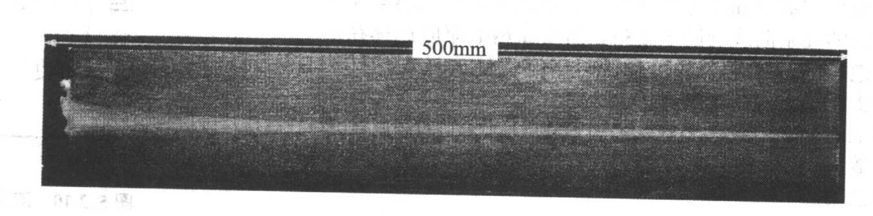
(a) 0.5kPa　(b) 10kPa　(c) 90kPa

图 5.2-5　气氛及真空度对电子束形状的影响

（在 0.5、10、90 kPa 氦气氛下电子束发散的形态）



(a) 非真空



(b) 真空

图 5.2-6　非真空与真空电子束焊缝金相照片

2.2　设备和装置

真空电子束焊接设备通常是由电子枪、高压电源、真空室（亦称工作室）、运动系统、真空系统及电气控制系统等部分组成。

2.2.1　电子枪

电子束焊接设备中用以产生和控制电子束的电子光学系统称为电子枪。图 5.2-7 为三极电子枪枪体结构示意图。现代电子束焊机多采用三极电子枪，其电极系统由阴极、偏压电极和阳极组成。阴极处于高的负电位，它与接地的阳极之间形成电子束的加速电场。偏压电极相对于阴极呈负电位，通过调节其负电位的大小和改变偏压电极形状及位置可以调节电子束流的大小和改变电子束的形状。

二极枪是由阴极、聚束极和阳极组成的电极系统。聚束极与阴极等电位。在一定的加速电压下，通过调节阴极温度来改变阴极发射的电子流，从而调节电子束流的大小。

在焊接电子枪中采用热电子发射能力强而且不易“中毒”的材料作阴极，常用的材料有钨、钽、六硼化镧（LaB_6）等。六硼化镧在较低的工作温度下具有很强的发射电子的能力，常用作大功率电子枪的间接加热式阴极。这种阴极在工作过程中遭受离子的轰击，会改变其形状和成分，使发射电子的能力随着阴极使用的时间有所变化。含钍的钨极，热电子发射能力强，但在长期工作中，正离子的轰击也

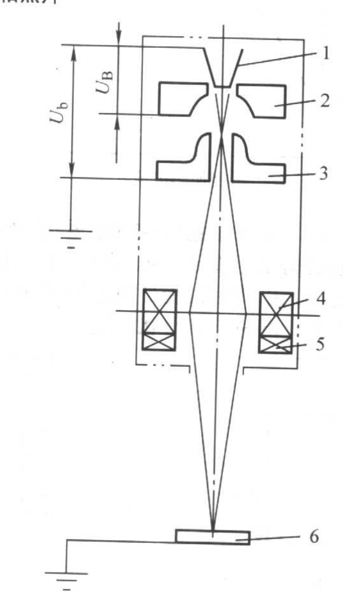


图 5.2-7　三极电子枪枪体结构示意图

1—阴极；2—偏压电极；3—阳极；4—聚焦线圈（电磁透镜）；5—偏转线圈；6—工件

U_b—加速电压；U_B—偏压

会使表面成分发生变化，影响其发射电子的稳定性。用钨或钽制成的直热式阴极结构简单，但要防止阴极的热变形和补偿加热电流的磁场对电子束的偏转作用。

阴极的温度是影响热电子发射能力的主要因素之一，下列公式为纯金属阴极发射电流密度的表达式。

$$j_e = RDT^2 \exp\ (-\Phi / kT)$$

式中，j_e 为发射电流密度，A/cm^2；R 为常数，因阴极材料而异，见表5.2-2；D 为阴极表面平均电子透射系数；T 为阴极热力学温度，K；Φ 为逸出功，eV；k 为玻耳兹曼常数，$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

表5.2-2列出了几种阴极材料的电子发射特性。

表 5.2-2　几种阴极材料的电子发射特性

金属	熔点 /K	R/A·cm^{-2}·K^{-2}	Φ/eV	$j_e = 3$ A/cm^2 时的温度 T_1/K	在温度 T_1 下的蒸发率/μg·cm^{-2}·s^{-1}
W	3 655	60～100	4.52～4.55	2 780	0.043
Re	3 450	50～120	4.72～5.10	2 590	0.043
Ta	3 300	37.2～55	4.10～4.19	2 585	0.043
Mo	2 895	51～115	4.15～4.37	2 580	14
Nb	2 770	29～37	3.96～4.10	2 560	0.42

阴极的加热方式有两种：直接加热和间接加热。对直热式阴极，加热电流的类型和大小是影响阴极寿命和电子束从技术上稳定的主要因素。在使用三极电子枪时，应在开环条件下，对特定形状和尺寸的阴极，实验测定阴极加热电流与电子束流的关系曲线（图5.2-8）。阴极加热电流应选择在曲线进入饱和区的 A 点处。这样既可以避免使用过大的加热电流而影响阴极寿命，又可以减小加热电流的波动对电子束从技术上的影响。对直热式阴极一般应采用直流加热，电流脉动系数应小于3%。交流加热电流产生的磁场会引起电子束周期摆动。

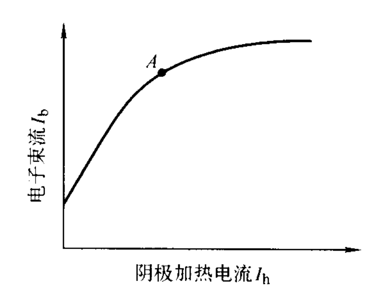


图 5.2-8　三极枪直热式阴极加热电流的选择

间热式阴极结构示于图5.2-9。在加热灯丝和阴极之间应加几千伏的电压，以使阴极受到热电子的撞击而升温。这种电极的热惯性大、寿命长、形状稳定。

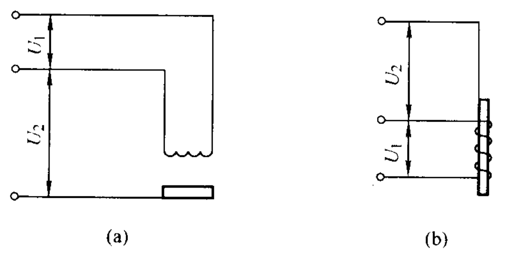


图 5.2-9　间热加热式阴极结构示意图

阴极的形状及其与偏压电极的相对位置是影响电子束斑点位置和形状及会聚角的重要因素。对于电子枪的阴极应采用精密加工和准确的成形工艺，装卸阴极应采用专用夹具，以便确保长期工作时阴极形状和位置的稳定性。通常，阴极形状及其相对位置的尺寸精度和重复装配精度应保持在0.05～0.15 mm范围内。

电子枪的电极系统还构成电子束的静电透镜，它使阴极发射的电子会聚在阳极附近，形成交叉点。电子束穿过阳极孔后，逐渐发散，然后通过电磁透镜（聚焦线圈）使电子束再次会聚在待焊工件表面而形成斑点。电子束会聚角越大，其斑点就越小。对于焊接电子枪，一般采用小会聚角电子束，不追求过小的电子束斑点。

电子枪的静电透镜和电磁透镜的各部件应保持同心（亦称合轴），否则电子束轨迹将发生畸变，在调节聚焦或改变束流时电子束将发生位置偏移，所以，电子枪上应设有机械式或电磁式的合轴调节机构。

大功率电子枪（大于30 kW）可设置两个聚焦线圈并在电子束通道上设置小直径光阑（图5.2-10），以减少金属蒸气和离子对电子枪工作稳定性的影响。同时，双聚焦还增加了调节电子束形状的可能性。

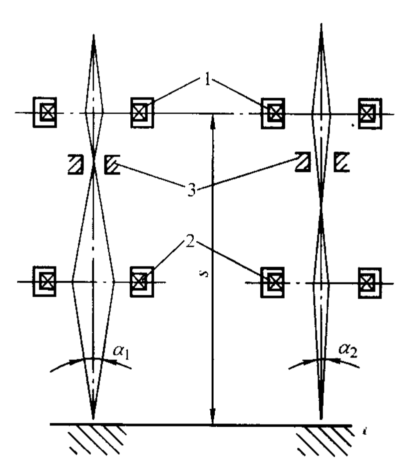


图 5.2-10　双聚焦线圈的电子枪示意图

1—第一聚焦；2—第二聚焦；3—光阑
s—工作距离；α—会聚角

偏转线圈用来使电子束作重复性摆动或偏移。偏转线圈的磁芯可选用高频特性好的铁氧体。在偏转频率高于10 kHz时，应采用空心偏转线圈，以保证偏转线圈的励磁电流与磁场强度的线性关系。

电子枪的电子光学设计是电子束焊机的重要环节，对于使用电子束焊机的技术人员也应具备有关电子光学的一些基本知识。

2.2.2　供电电源

供电电源是指电子枪所需要的供电系统，通常包括高压电源、阴极加热电源和偏压电源。这些电源装在充油的箱体中，称为高压油箱。纯净的变压器油既可作绝缘介质，又可作为传热介质将热量从电器元件传送到箱体外壁。电器元件都装在框架上，该框架又固定在油箱的盖板上，以便维修和调试。

1）高压电源　直流高压电源是用来建立阴极－阳极之间的高压电场，它的稳定性对于保证电子束斑点的质量、参数的稳定、聚焦和偏转等都是至关重要的。一般高压电源在开环状态下特性较软，即在负载逐步增加到额定值时，其输出电压比空载电压要下降15%～20%。为满足焊接工艺的要求，应设计合理的闭环控制系统，以使输出电压稳定在±1%的范围内。

2）阴极加热电源　直热式阴极加热电源应采用具有良好滤波的直流电源，对要求不高的某些专用焊机可采用交流供电。电源的输出电压和电流取决于所用阴极形状和尺寸。



对于带状钨极，加热电压约为 5～10 V，加热电流约为 10～70 A。

间热式阴极通常为电子轰击式，除加热灯丝的电源外，轰击电压为若干千伏，轰击电子流为 100～200 mA。

3）偏压电源　三极枪的偏压电源应能使电子束流从零到额定值连续可调。一般偏压应能在 100～2 000 V 之间调节。为了使电子束流稳定在允许的范围内（一般应为 ±1%），偏压电源及其控制回路应具有良好的调节特性。常用的偏压电源是调节偏压变压器低压输入端电压的整流电源。为了改善偏压电源的动态特性，可以采用逆变电源，也可以直接控制偏压电源的高压输出端电压。对于后者，由于偏压电源接在电子枪的负高压端，所以在控制系统中采用了光导纤维来传输控制信号，以解决高压绝缘问题。

图 5.2-11 示出电子束流调节原理框图。因为电子枪是非线性元件，所以可在束流反馈控制系统中设线性化电路，并采用电压前馈等措施，以改善调节系统的特性。

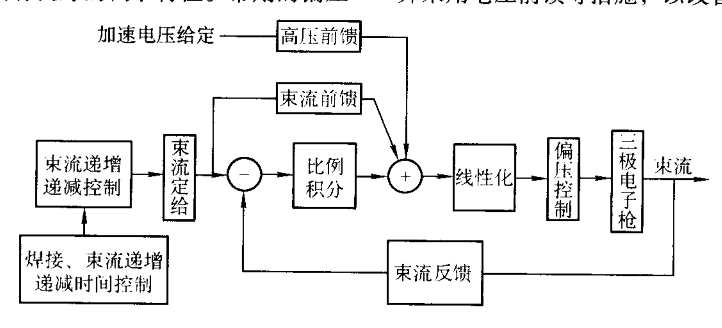


图 5.2-11　电子束流调节原理图

2.2.3　真空系统

真空系统是对电子枪和真空室抽真空用的。该系统中大多使用三种类型的真空泵。一种是活塞式或叶片式机械泵，也称为低真空泵，能够将电子枪和工作室从大气压抽到 10 Pa 左右。在低真空焊机、大型真空室或对抽气速度要求较高的设备中，这种机械泵应与双转子真空泵（亦称罗茨泵）配合使用，以提高抽速并使工作室压强降到 1 Pa 以下。一种是油扩散泵，用于将电子枪和工作室的压强降低到 10^{-2} Pa 以下。油扩散泵不能直接在大气压下起动，必须与低真空泵配合组成高真空抽气机组。在设计抽真空程序时应严格按照真空泵和机组的使用要求，否则将造成扩散泵油氧化，真空容器的污染甚至损坏真空设备等后果。还有一种是涡轮分子泵，它是抽速极高的高真空泵，又不像油扩散泵那样需要预热，同时也避免了油的污染，多用于电子枪的真空系统。

图 5.2-12 示出了一种通用型高真空电子束焊机的真空系统的组成。真空室是用机械泵 P1、P2 和扩散泵 P3 来抽真空的，为了减少扩散泵的油蒸气对电子枪的污染，应在扩散泵的抽气口处装置水冷折流板（亦称冷阱），在有无油真空的要求时，可采用低温泵（以液氮为介质）替代油扩散泵。对于电子枪则采用机械泵 P4 和涡轮分子泵 P5 来抽真空，这不仅消除了油蒸气的污染，不需要预热，而且缩短了电子枪的抽真空时间。

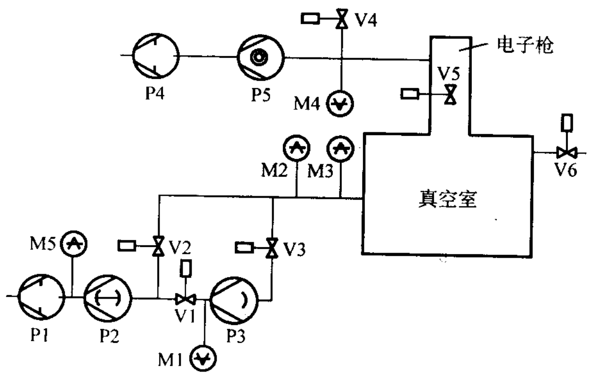


图 5.2-12　高真空电子束焊机的真空系统

P1、P4—旋片泵；P2—罗兹泵；P3—油扩散泵；
P5—涡轮分子泵；M1～M5—真空检测计；
V1～V6—各种阀门，其中 V4 和 V6 是进气阀

整个真空系统可以与真空室装在同一个底座上，应该用柔性管道将机械泵连接到真空系统上，以减少振动对电子枪和工作室的影响。在真空系统中应设置测量装置以显示真空度，并进行抽真空的程序转换。测量低真空（压强高于 10^{-1} Pa）时多采用电阻真空计，测量高真空时多采用电离式或磁放电式真空计。

图 5.2-12 中装置在电子枪和真空室之间的阀门 V5 可使两者隔离。关闭此阀门，可以在更换工件或阴极时使电子枪或真空室保持在真空状态。

图中所示的真空系统工作顺序如下：

机械泵 P1 起动，P2 延时起动，阀门 V1 开启，V2、V3、V5、V6 关闭，预抽扩散泵；

当 M1 所测真空度小于 10 Pa 时，起动扩散泵 P3，进行预热；

当 M1 所测真空度小于 1 Pa 时，关闭 V1，打开 V2，预抽真空室；

当 M2 所测真空度小于 1 Pa 时，真空室预抽成功，关闭 V2，打开 V1、V3，用扩散泵抽真空室高真空；

当 M3 所测真空度达到预期指标，如 4×10^{-2} Pa 时，真空室抽真空准备就绪；

V4 关闭，P4 起动，P5 延时起动，当 M4 所测真空度达到预期指标，如 2×10^{-2} Pa 时，电子枪抽真空准备就绪；

打开 V5，进行焊接；

焊接完成，打开 V6，进气。

如不再进行焊接，在关闭系统的过程中，扩散泵 P3 和涡轮分子泵 P5 关闭后，机械泵 P1、P2 和 P4 应延时工作至规定时间后关闭，以保证真空系统不被损坏。

电子束焊机真空系统的组成以及工作顺序有多种形式，以上只是其中之一。目前工业使用的电子束焊机，采用可编程控制器（PLC）或计算机自动进行真空室的抽气准备。

抽真空的速率取决与真空泵的抽速、工件和夹具的结构尺寸、真空室的容积、所要求的真空度以及真空系统的漏气速率等因素。理论上说，真空系统可以实现任何合理的抽气时间需求，但要求越高，投资越大。一般说来，采用国产的真空泵，将真空室从大气压抽到 4×10^{-2} Pa 的压强，对于容积为 1 m^3 左右的真空室，需要 5 min 左右的时间；对于容积为 10 m^3 左右的真空室，需要 20 min 左右的时间；对于更大的真空室，只要真空系统匹配得当，也可以在 40 min 之内完成。



2.2.4　真空室

真空室（亦称工作室）提供了进行电子束焊接的真空环境，同时将电子束与操作者隔离开来，防止电子束焊接时产生的X射线对人体和环境的伤害。真空室的尺寸及形状应根据焊机的用途和被加工的零件来确定。真空室一般采用低碳钢和不锈钢制成，碳钢制成的工作室内表面应镀镍或做其他处理，以减少表面吸附气体、飞溅及油污等，缩短抽真空时间和便于真空室的清洁工作。

真空室的设计应满足承受大气压所必需的刚性、强度指标和X射线防护的要求。中低压电子束焊机（加速电压小于或等于60 kV），可以靠真空室钢板的厚度和合理设计工作室结构来防止X射线的泄漏。高压电子束焊机（加速电压高于60 kV）的电子枪和真空室必须设置严密的铅板防护层，铅防护层通常粘接在真空室的外壁上。

真空室可采用整板结构和带加强筋的薄板结构。10 m^3 容积以下的工作室尽可能采用整板结构，这种结构的真空室制造工艺简单，易于粘接铅防护板，但真空室笨重，刚性差。采用加强筋的薄板结构，其真空室刚性强，但制造工艺复杂。

真空室的容积和形状应根据焊机的用途来选择。通用型电子束焊机的真空室容积大，多呈长方形或圆柱形。对专用型电子束焊机应根据被焊工件来设计工作室，特别是对生产率高的焊机，应尽量减小真空室容积，以减少抽真空时间。由于电子束焊接适用范围很广，所以电子束焊机真空室的结构多种多样，其尺寸也大小不一。目前电子束焊机真空室的容积范围是从几升到数千立方米。

电子束焊机的使用者未得到焊机设计者的允许，不得随意改装真空室，以免出现X射线的泄漏、真空室的变形等问题。

2.2.5　运动系统

运动系统使电子束与被焊零件产生相对移动，实现焊接轨迹，并在焊接过程中保持电子束与接缝的位置准确和焊接速度的稳定，一般由工作台、转台及夹具组成。

电子束焊机大多将电子枪固定在真空室顶部，运动系统使工件运动来实现接缝的焊接。高压电子束焊机给电子枪供电的电缆粗大，柔性差，一般采用定枪结构。对大型真空室的中低压电子束焊机，为了充分利用真空室，也可以使工件不动，而使电子枪运动进行焊接。图5.2-13是典型的通用高压真空电子束焊机的运动系统，采用定枪结构以及可移出真空室外的数控工作台和转台。

为了提高生产率，可采用多工位夹具，抽一次真空可以焊接多个零件。图5.2-14a所示的多工位焊接夹具装在真空室内，同时装有14个零件，一次焊接完成。图5.2-14b所示的是两工位齿轮组合体电子束焊机，一个工位在真空室外进行装配和拆卸已焊好的齿轮，另一工位在真空室内进行焊接。由于多工位夹具应用于大批量生产中，对其重复定位精度要求很高。

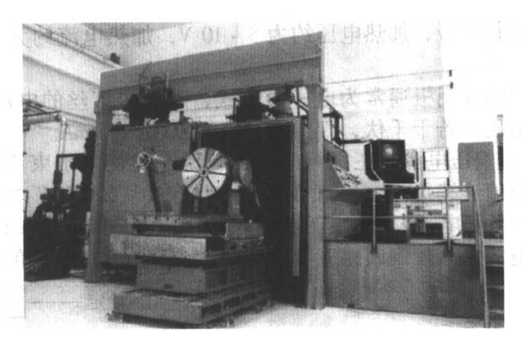
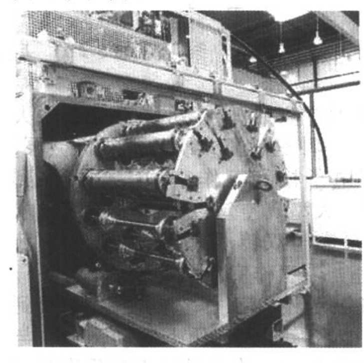
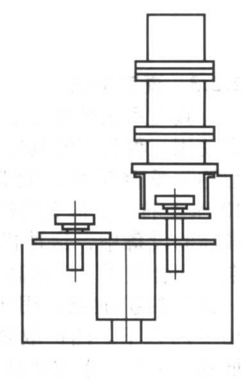


图5.2-13　ZD150－15A高压电子束焊机



(a)



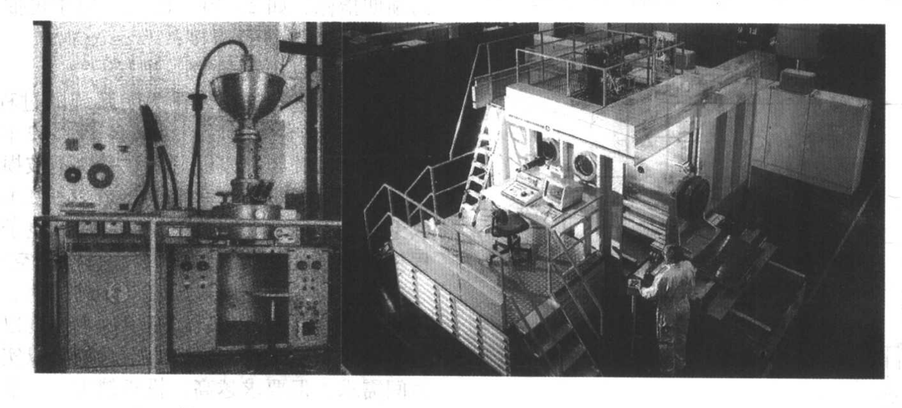
(b)

图5.2-14　多工位装配焊接夹具

2.2.6　电气控制系统

控制系统就是电子束焊机的操作系统，通过将上述各部分功能的组合，完成优质的焊缝，也标志着电子束焊机工业应用的成熟程度。

图5.2-15a所示是保存在慕尼黑德国博物馆1958年生产的世界首台真空电子束焊机，手动操作，各部分之间没有协调关系。图5.2-15b为当代先进的电子束焊机，采用可编程控制器（PLC）或工控机控制各部分的逻辑关系，实现焊接过程自动化。



(a)　　(b)

图5.2-15　世界首台（a）和当代先进的（b）真空电子束焊机

2.2.7　辅助系统

1）电子束束斑品质测量　电子束束斑品质直接影响电子束焊接质量。电子束通过电子光学系统聚焦使斑点变小，成为一点（焦点），如图5.2-16a所示。但实际上，由于电子

之间的斥力作用，限制了电子束斑点的继续缩小，形成的焦点是如图 5.2-16b 所示直径相对稳定的一段柱状区，称为活性区。活性区的长度根据电子枪的不同而变化，一般在 5 ~ 20 mm 之间。虽然有活性区的存在，可以使电子束焊接工艺规范适应性更强，但是要获得优质的焊缝就必须了解电子束的焦点位置。一般的方法是在焊接前将小束流（几毫安）作用在试片上，调整聚焦状态，用肉眼观察斑点的亮度，以最亮时作为焦点位置进行焊接。由于电子束的聚焦状态是随着束流大小而变化的，对于大厚度零件的焊接，焊接束流大，束流变化引起的焦点位置偏差大，获得优质的焊缝就必须进行大量的焊接工艺实验。

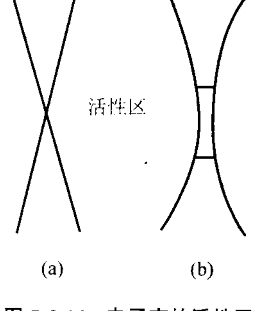
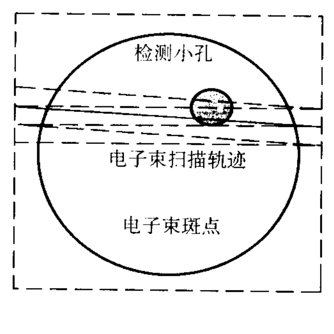


图 5.2-16　电子束的活性区

检测焊接束流的焦点位置及束斑品质是重要的。Arata 法是传统的检测手段，它是将金属片竖直放置在不同的高度，呈锯齿斜坡状，电子束沿斜坡扫过，通过测量电子束在金属片上的痕迹，可以定性地了解电子束在不同工作距离的斑点品质。Arata 法检测的结果误差大，金属片不能重复使用，有明显的局限性。图 5.2-17 所示的是当代先进的电子束品质检测方法之一。图 5.2-17a 中的大圆是测试位置电子束横截面，方框虚线为传感器，黑色小圆是传感器的接受孔（直径一般为 20 μm 左右），传感器静止不动，电子束以面扫描方式高速扫描传感器，相当于传感器高速扫描静止的电子束束斑，传感器所记录的信号经过处理就能获得电子束束斑品质的量化特征，包括束斑直径和电子束能量密度分布，如图 5.2-17b 所示。传感器在冷却系统的辅助下，可以检测100 kW 功率高速扫描电子束的能量密度分布。对于中小功率的电子束，可以采用探针式传感器高速扫描静止的电子束进行检测。



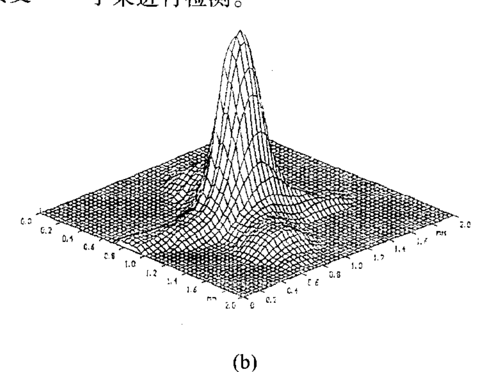


图 5.2-17　电子束束斑品质的测量方法及结果

2）焊缝观察和跟踪　为了便于观察电子束与接头的相对位置、电子束焦点状态、工件移动和焊接过程，在电子枪和真空室装置光学观察系统、工业电视、二次电子成像系统和观察窗口等。图 5.2-18 示出了装置在电子枪上的光学观察系统的结构简图，通过这个系统操作者可以得到放大了的电子束和焊缝的图像，这种方式适用于定枪结构。采用工业电视和二次电子成像系统可以使操作者连续地观察焊接过程，避免了肉眼受强烈光纤刺激的危害，并且适用于动枪结构。所有的观察装置应采取措施防止金属飞溅、蒸气引起的污染和损害。

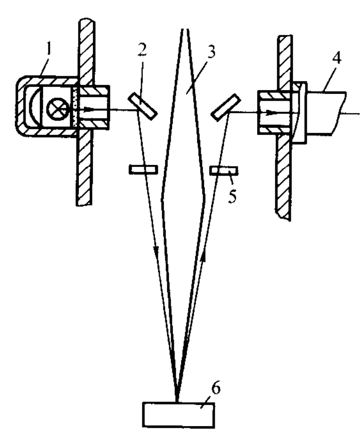


图 5.2-18　与电子束同轴的光学观察系统

1—光源；2—反射镜；3—电子束；
4—观察镜；5—保护片；6—工件

对观察系统得出的图像进行处理，并且与数控的运动系统相结合，可以实现焊缝的示教和实时跟踪。由于电子束焊接零件的加工及装配精度较高，所以一般不需采用实时焊缝跟踪系统。

2.2.8　电子束焊接装置的几种形式

电子束焊机主要有真空和非真空两种形式，如图 5.2-19 所示。电子枪需要在高真空下工作，图 5.2-19b 采用分级过渡真空将电子束引入大气，成为非真空电子束焊接。根据加工零件的需要，应用移动密封技术，也能够以连续真空和局部真空的方式进行焊接。如图 5.2-20 所示，图 5.2-20a 是通过分级真空室使得零件直接从大气传递到真空的焊接位置，进行

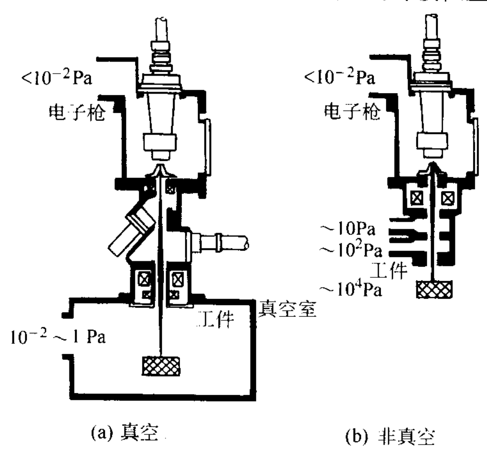


图 5.2-19　真空和非真空电子束焊接

连续焊接，多用于条带的拼焊生产线。图 5.2-20b 是局部真空的示意图，电子枪可以静止在某一位置进行局部焊接，也可移动以局部的形式完成整体的焊接工作。

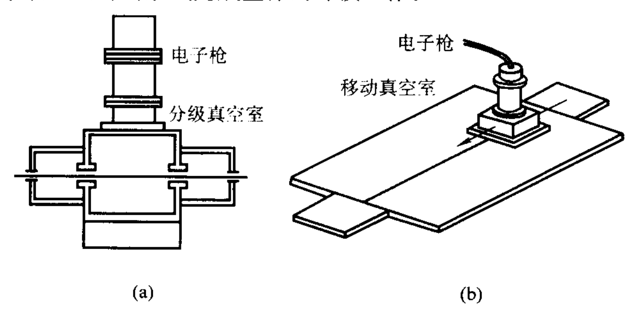


图 5.2-20 连续真空和局部真空电子束焊接

2.3 接头设计和焊接工艺

2.3.1 焊接接头设计

常用的电子束焊接接头是对接、角接、T 形接、搭接和端接。电子束斑点直径小，能量集中，焊接时一般不加焊丝，设计接头时应注意这些特点。

对接接头是最常用的接头形式。图 5.2-21 中 a、b、c 三种接头的准备工作简单，但需要装配夹具，不等厚的对接接头采用上表面对齐的设计优于台阶接头，后者在焊接时要用宽而倾斜的电子束。带锁口的接头，便于装配对齐，锁口较小时焊后可避免留下未焊合的缝隙。g、h 接头皆有自动填充金属的作用，焊缝成形得到改善。斜对接接头只用于受结构和其他原因限制的特殊场合。角接头是仅次于对接的常用接头，如图 5.2-22 所示。熔透焊缝的角接头 a 留有未焊合的间隙，接头承载能力差。h 为卷边角接，主要用于薄板，其中

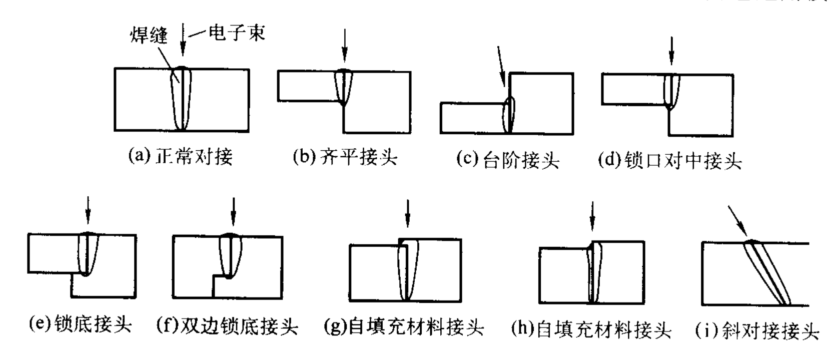


图 5.2-21 电子束焊的对接接头

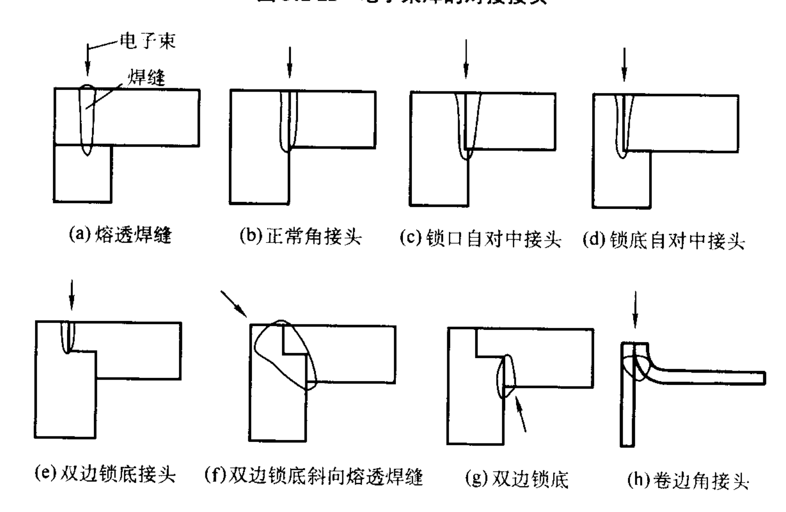


图 5.2-22 电子束焊的角接头

一件须准确弯边 90°。其他几种接头都易于装配对齐。

T 形接头也常用于电子束焊接，如图 5.2-23 所示。熔透焊缝在接头区有未焊合缝隙，接头强度差。推荐采用单面 T 形接头，焊接时焊缝易于收缩，残余应力较低。c 方案多用于板厚超过 25 mm 的场合。

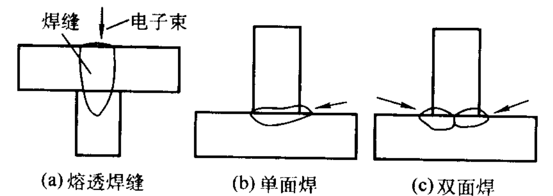


图 5.2-23 电子束焊 T 形接头

搭接接头多用于板厚 1.5 mm 以下的场合，如图 5.2-24 所示。熔透焊缝主要用于板厚小于 0.2 mm 的场合，有时需要采用散焦或电子束扫描以增加熔合区宽度。厚板搭接接头焊接时需添加焊丝以增加焊角尺寸，有时也采用散焦电子束以加宽焊缝并形成光滑的过渡。

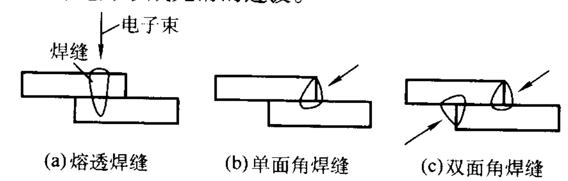


图 5.2-24 电子束焊搭接接头

图 5.2-25 为端接接头，厚板端接接头常采用大功率深熔透焊接。薄板及不等厚度的端接接头常用小功率或散焦电子束进行焊接。

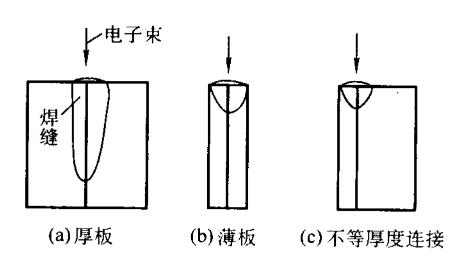


图 5.2-25　电子束焊端接接头

对重要承力结构，焊缝位置最好应避开应力集中区，图 5.2-26 所示的接头设计，可以改善角接头和 T 形接头的动载特性。该接头可从两个方向（a 或 b）进行焊接，当工件是磁性材料，又必须从 a 向进行焊接时，接缝到腹板的距离 d 应足够大。应用类似的接头形式，可以将不等厚度接头过渡成为等厚度接头，进行焊接，对厚度差较大的焊接接头尤为适用。

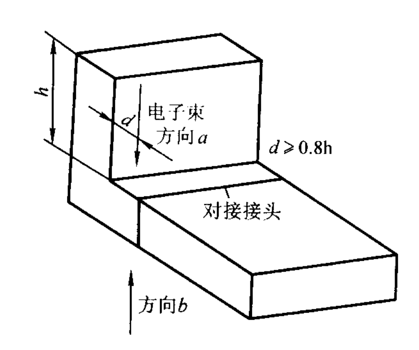


图 5.2-26　用对接代替角接接头

采用多道焊缝可以在同样电子束功率下焊接更厚的工件。例如，采用正反两条焊缝可以将熔深提高到单道焊缝所能达到的熔深的两倍。

对于多层结构中各层的接头位置相同时，可采用分层焊缝的接头设计。分层焊缝是指在同一个电子束方向上将几层对接接头用电子束一次穿透焊接而成的焊缝。为保证各层焊缝成形良好，必须仔细选择电子束参数。

2.3.2　辅助工序

1）工件的准备和装夹　待焊工件的接缝区应精确加工、清洗、装配和固定。

接头清洗不当会形成焊接缺陷，降低接头的性能。不清洁的表面还会延长抽真空时间，影响电子枪工作的稳定性，降低真空泵的使用寿命。

工件表面的氧化物、油污应用化学或机械方法清除。煤油、汽油可用于除油，乙醇和丙酮是清洗电子枪零件和被焊工件最常用的溶剂。已清洗干燥后的工件，不得用手或不清洁的工具接触接缝区。

装配零件时应力求使零件紧密接触，接缝间隙应尽可能小而均匀。被焊材料越薄则间隙应该越小。一般装配间隙不应大于 0.13 mm。当板厚超过 15 mm 时，允许间隙可放宽到 0.25 mm。非真空电子束焊时，装配间隙可以放宽到 0.8 mm。

电子束焊接是自动进行的，工件应准确装夹和对中。电子束焊接所用的夹具与电弧焊所用的夹具结构和性能类似。但其定位和传动精度要高一些，其刚性可以弱一些。为了防止穿透焊时电子束对零件和夹具的损坏，应在接缝背面放置铜垫块，接头附近的夹具和工作台的零部件最好使用非磁性材料来制造，以防磁场对电子束的干扰。

磁性材料的工件经过磁粉检验或在电磁吸盘上进行磨削加工或电化学加工后，会存留剩磁。允许的剩磁强度为 $(0.5\sim4)\times10^{-4}$ T。当工件上剩磁强度过大时应进行退磁处理。退磁的方法是将工件从工频感应磁场缓慢地移出或者将此感应磁场强度逐渐降低到零。

工件、夹具和工作台应保持良好的电接触，不允许在其间垫绝缘材料。夹具和工作台的接头应有利于真空，尽量避免狭长的缝隙和空间大、抽气口小的所谓气袋结构。

2）抽真空　现代电子束焊机的抽真空程序是自动进行的，这样可以保证各种真空机组和阀门正确地按顺序进行，避免由于人为的误操作而发生事故。

保持真空室的清洁和干燥是保证抽真空速度的重要环节。应经常清洁真空室，尽量减少真空室暴露在大气中的时间，仔细清除被焊工件上的油污并按期更换真空泵油。同样，电子束焊机的工作环境温度应控制在 12～35℃之间，厂房应配有空气干燥系统以降低环境湿度。

3）焊前预热和焊后热处理　对需要预热的工件，一般可在工件装入真空室前进行。根据工件的形状、尺寸及所需要的预热温度，选择一定的加热方法（如气焊枪、加热炉、感应加热、红外线辐射加热等）。在工件较小，加热引起的变形不会影响工件质量时，可在真空室内用散焦电子束来进行预热，这是常使用的方法。

对需要进行焊后热处理的工件，可在真空室内或在工件从真空室取出后进行。

2.3.3　焊接工艺

1）薄板的焊接　板厚在 0.03～2.5 mm 的零件多用于仪表、压力或真空密封接头、膜盒、封接结构、电接点等构件中。

薄板导热性差，电子束焊接时局部加热强烈。为防止过热，应采用夹具。对极薄工件可考虑使用脉冲电子束流。

电子束功率密度高，易于实现厚度相差很大的接头的焊接。焊接时薄板应与厚度紧贴，适当调节电子束焦点位置，使接头两侧均匀熔化。

2）厚板的焊接　电子束可以一次焊透 300 mm 的钢板，焊道的深宽比可以高达 50:1。当被焊钢板厚度在 60 mm 以上时，应将电子枪水平放置进行横焊，以利于焊缝成形。电子束焦点位置对熔深影响很大，在给定的电子束功率下，将电子束焦点调节在工件表面以下，熔深的 0.5～0.75 处电子束的穿透能力最好。根据实践经验，焊前将电子束焦点调节在板材表面以下，板厚的 1/3 处，可以发挥电子束的熔透效力并使焊缝成形良好。

焊接厚板时，保持良好的真空度有利于增大电子束焊缝的熔深。

3）添加填充金属　只有在对接头有特殊要求或者因接头准备和焊接条件的限制不能得到足够的熔化金属时，才添加填充金属，其主要作用是：①在接头装配间隙过大时可防止焊缝凹陷；②在焊接裂纹敏感材料或异种金属接头时可防止裂纹的产生；③在焊接沸腾钢时加入少量含脱氧剂（铝、锰、硅等）的焊丝，或在焊接铜时加入镍均有助于消除气孔。

添加填充金属的方法是在接头处放置填充金属。箔状填充金属可夹在接缝的间隙处，丝状填充金属可用送丝机构送入或用定位焊固定。

送丝机构应保证焊丝准确地送入电子束的作用范围内。送丝嘴应尽可能靠近熔池，其表面应有涂层以防金属飞溅物的沾污。应选用耐热钢来制造送丝嘴。应能方便地对送丝机构进行调节，以改变送丝嘴到熔池的举例、送丝方向以及与工件的夹角等。焊丝应从熔池前方送入。焊接时采用电子束扫描有助于焊丝的熔化和改善焊缝成形。

送丝速度和焊丝直径的选择原则是使填充金属量为接头凹陷体积的 1.25 倍。

4）定位焊　用电子束进行定位焊是装夹工件的有效措

施，其优点是节约装夹时间和经费。

可以采用焊接束流或弱束流进行定位焊，对于搭接接头可用熔透法定位，有时先用弱束流定位，再用焊接束流完成焊接。

5）焊接可达性差的接头　电子束很细、工作距离长、易于控制，所以电子束可以焊接狭窄间隙的底部接头。这不仅可以用于生产过程，而且在修复报废零件时也非常有效。复杂形状的昂贵铸件常用电子束来修复。

对可达性差的接头只有满足以下条件才能进行电子束焊接：①焊缝必须在电子枪允许的工作距离上；②必须有足够宽的间隙允许电子束通过，以免焊接时误伤工件；③在电子束的路径上应无干扰磁场。

6）电子束扫描和偏转　在焊接过程中采用电子束扫描可以加宽焊缝，降低熔池冷却速度，消除熔透不均等缺陷，降低对接头准备的要求。

电子束扫描是通过改变偏转线圈的励磁电流，从而使横向磁场变化来实现的。常用的电子束扫描图形有正弦形、圆形、矩形、锯齿形等。通常电子束扫描频率为 100～1 000 Hz，电子束偏转角度为 2°～7°。

电子束扫描还可用来检测接缝的位置和实现焊缝跟踪，此时电子束的扫描速度可以高达 50～100 m/s，扫描频率可达 20 kHz。

6）焊接缺陷及其防治　和其他熔化焊一样，电子束接头也会出现未熔合、咬边、焊缝下陷、气孔、裂纹等缺陷。此外电子束焊缝特有的缺陷有熔深不均（spiking）、长空洞、中部裂纹和由于剩磁或干扰磁场造成的焊道偏离接缝等。

熔深不均出现在不穿透焊缝中。当在焊缝根部还出现孔洞时，称为焊缝根部钉形缺陷，如图 5.2-27 所示，这种缺陷是高能束流焊接所特有的。它与电子束焊接时熔池的形成和金属的流动有密切的关系。加大束斑直径可消除这种缺陷。将电子束作圆形扫描，获得图 5.2-28 所示的功率分布，有利于消除熔深不均。改变电子束焦点在工件内的位置也会影响到熔深的大小和均匀程度。适当地散焦可以加宽焊缝，有利于消除和减小熔深不均的缺陷。



图 5.2-27　非穿透焊缝根部纵剖面金相照片

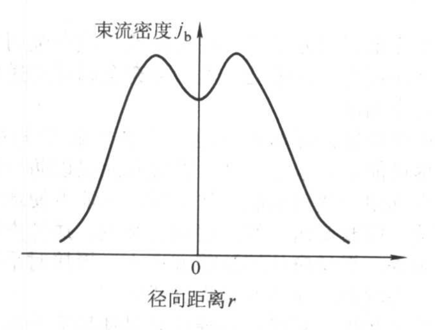


图 5.2-28　消除熔深不均所需要的电子束能量密度分布

长空洞及焊缝中部裂纹都是电子束深熔透焊接时所特有的缺陷，降低焊接速度，改进材质有利于消除此类缺陷。

2.3.4　焊接工艺参数的选择

电子束焊接工艺参数主要有电子束电流、加速电压、焊接速度、聚焦电流和工作距离等。一般说来，焊接深度和加速电压、束流成正比，和束斑直径（受聚焦电流影响）、工作距离、焊接速度成反比。

加速电压的增加可使熔深加大。在保持其他参数不变的条件下，焊缝横断面深宽比与加速电压成正比例。增加电子束流，熔深和熔宽都会增加。增加焊接速度会使焊缝变窄，熔深减小。电子束聚焦状态对熔深及焊缝成形影响很大。焦点变小可使焊缝变窄，熔深增加。

对于不同的设备，焊接同一零件，由于电子枪结构、加速电压和真空度的差异，电子束的束流品质也不相同，所采用的电子束焊接工艺参数也就不同。即使对于同一台电子束焊接设备，焊接同一零件，也可能几组参数都适用。如图 5.2-29 所示，钢的电子束焊接工艺参数有一个较大的选择范围（阴影部分所示），针对不同零件的具体要求，可以选择更为合适的工艺参数进行焊接。

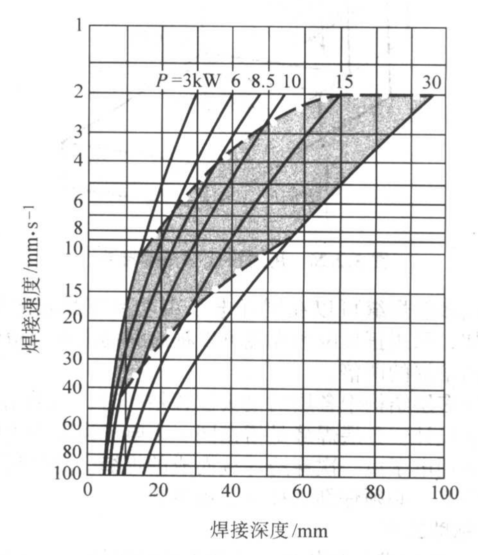


图 5.2-29　钢的电子束焊接工艺参数图

对于确定的电子束焊接设备，加速电压一般固定不变，必须时也只做较小的调整。厚板焊接时应使焦点位于工件表面以下 0.5～0.75 熔深处；薄板焊接时，应使焦点位于工件表面。工作距离应在设备最佳范围内。焊接电流和焊接速度是主要调整的工艺参数。

焊接线能量是焊接工艺参数综合作用的结果，对于一种材料，焊接厚度和焊接线能量有对应的函数关系。电子束焊接时线能量的计算公式为：

$$q = U_b I_b / v$$

式中，q 为线能量，J/mm；U_b 为加速电压，V；I_b 为电子束流，A；v 为焊接速度，mm/s。

线能量与电子束焊接功率成正比，与焊接速度成反比。

利用焊接线能量与焊接厚度的对应关系，初步选定焊接工艺参数，经实验修正后方可作为实际使用的焊接工艺参数。此外，还应考虑焊缝横断面、焊缝外形及防止产生焊缝缺陷等因素，综合选择和实验确定焊接工艺参数。

2.4　几种材料的焊接

在熔焊方法中，真空电子束焊接是材料可焊性较好的焊接方法之一。常用的金属、合金、金属间化合物等都可以采



用电子束焊接结构，并且焊接接头与其他熔焊方法相比具有更佳的力学性能。

2.4.1　钢

1）低碳钢　低碳钢易于焊接。与电弧焊相比，焊缝和热影响区晶粒细小。焊接沸腾钢时，应在接头间隙处夹一厚度为 0.2 ~ 0.3 mm 的铝箔，以消除气孔。半镇静钢焊接有时也会产生气孔，降低焊速、加宽熔池也有利于消除气孔。

2）合金钢　这些钢材电子束焊接的焊接性与电弧焊类似。经热处理强化的钢材，在焊接热影响区的硬度会下降，采用焊后回火处理可以使其硬度回升。

焊接刚性大的工件时，特别是基本金属已处于热处理强化状态时，焊缝易出现裂纹。合理设计接头时焊缝能够自由收缩；采用焊前预热、焊后缓冷以及合理选择焊接条件等措施可以减轻淬硬钢的裂纹倾向。对于需进行表面渗碳、渗氮处理的零件，一般应在表面处理前进行焊接。如果必须在表面处理后进行焊接，则应先将焊缝区的表面处理层除去。

含碳量低于 0.3% 的低合金钢焊接时不需要预热和缓冷。在工件厚度大、结构刚性强时需预热到 250 ~ 300℃。对焊前已进行过淬火和回火处理的零件，焊后回火温度应略低于原回火温度。轻型变速箱的齿轮大多采用电子束来焊接组合。齿轮材料是 20CrMnTi 或 16CrMn，焊前材料处于退火状态。焊后进行调质和表面渗碳处理。

合金高强度钢的含碳量（或碳当量）高于 0.30% 时，应在退火或正火状态下焊接，也可以在淬火加正火处理后焊接。当板厚大于 6 mm 时应采用焊前预热和焊后缓冷，以免产生裂纹。

对于含碳量大于 0.50% 的高碳钢，用电子束焊接时开裂倾向比电弧焊低。轴承钢也可用电子束焊接，但应采用预热和缓冷。

3）工具钢　工具钢的电子束焊接接头性能良好，生产率高。例如：4Cr5MoVSi 钢焊前硬度为 50HRC，厚度为 6 mm。焊后进行 550℃ 正火，焊缝金属的硬度可以达到 56 ~ 57HRC，热影响区硬度下降到 43 ~ 46HRC，但其宽度只有 0.13 mm。

4）不锈钢　不锈钢的电子束可焊性较好，电子束焊接设备通常以不锈钢的最大焊接深度及焊缝深宽比作为设备焊接能力的标志。

奥氏体钢的电子束焊接接头具有较高的抗晶间腐蚀的能力，这是因为高的冷却速度可以防止碳化物的析出。

马氏体钢可以在任何热处理状态下焊接，但焊后接头区会产生淬硬的马氏体组织，而且随着含碳量的增加和焊接速度的加快，马氏体的硬度将提高，开裂敏感性也较强。

沉淀硬化不锈钢的焊接接头的力学性能较好。含磷高的沉淀硬化不锈钢的焊接性差。半奥氏体钢，例如：17 - 7PH 和 PH14 - 8Mo，焊接性很好，焊缝为奥氏体组织。降低半马氏体钢的含碳量可以降低马氏体的硬度，改善其焊接性。

2.4.2　铝和铝合金

焊前应对接缝两侧宽度不小于 10 mm 的表面应用机械和化学方法做除油和清除氧化膜处理。

铝合金的熔点低，焊接时合金中一些元素汽化而产生焊缝气孔，在高速焊时尤为明显。为了防止气孔和改善焊缝成形，对厚度小于 40 mm 铝板，焊速应在 60 ~ 120 cm/min；对于 40 mm 以上的厚铝板，焊速应在 60 cm/min 以下。

利用电子束扫描焊接或将焊缝用电子束再熔化一次，有利于消除焊缝气孔，改善焊缝成形。添加焊丝可改善焊缝成形，补偿合金元素（Mn、Mg、Zn、Li 等）的蒸发，消除焊缝缺陷，还可降低裂纹倾向。

采用高速来焊接热硬铝合金对于减小软焊缝的宽度和热影响区的宽度是有好处的。

2.4.3　钛和钛合金

钛是一种非常活泼的金属，所以应在良好的真空条件下（$< 1.33 \times 10^{-2}$ Pa）进行焊接，电子束焊接是钛及钛合金理想的焊接方法。

氢气孔是熔化焊接钛时最常见的缺陷。预防措施是降低熔池中氢含量和保证良好的结晶条件，例如：焊前接缝进行化学清洗和刮削，施加重复焊道，焊速低于 30 cm/min 以下。用碱或碱土金属的氟化物为基的熔剂对熔池进行冶金处理对消除气孔很有效，例如将氟化钙加入熔池，可以消除 30 mm 厚钛合金焊缝中的气孔。

TC_4 是一种常用的钛合金，它可以在退火或固溶时效条件下焊接。焊后接头强度与基体金属相差无几，断裂韧性略差，疲劳强度可达到基体金属的 95%。

2.4.4　铜和铜合金

由于铜的导热性好，焊接热源的热量易散失，因此用能量密度高的电子束焊接铜具有突出的优点。对于 40 mm 厚的铜板，采用电子束焊接所需要的线能量是自动埋弧焊所需线能量的 1/5 ~ 1/7。焊缝横断面积是其 1/25 ~ 1/30。

焊接铜合金可能发生的主要缺陷是气孔。对于厚度为 1 ~ 2 mm 的铜板，焊缝中不易产生气孔。对于厚度为 2 ~ 4 mm 的铜板，焊速应低于 34 cm/min，才可防止产生气孔。厚度大于 4 mm 时，焊速过慢将使焊缝成形变坏，焊缝空洞变多。增加装配间隙、焊前预热和重复施焊都是减少焊缝气孔的有效措施。

为了减少金属的蒸发，对厚度为 1 ~ 2 mm 的铜板，电子束焦点应处在工件表面以上。对厚度大于 15 mm 时可将电子枪水平放置，进行横焊。

2.4.5　镁合金

一般说来，能用电弧焊焊接的镁合金也能用电子束焊接，两种方法采用相同的焊前和焊后处理工艺。由于合金里镁和锌在真空里的蒸气压很高，易于产生气孔。当镁合金的含锌量大于 1% 时，很难形成致密的焊缝。电子束焊接工艺参数应进行闭环控制，以防止焊缝根部过热和产生气孔。电子束扫描焊接有助于消除气孔。

2.4.6　难熔金属

锆、铌、钼、钨等属难熔金属。

锆非常活泼，焊接应在真空度达 1.33×10^{-2} Pa 以上的“无油”高真空中进行。接头准备和清洗是至关重要的。焊后退火可提高接头抗冷裂和延迟破坏的能力。退火条件是在 1 023 ~ 1 128K 的温度下保温 1 h，随炉冷却。焊接锆所用的线能量与同厚度的钢相近。

铌的电子束焊接也应在优于 1.33×10^{-2} Pa 的高真空下进行。真空室的泄漏率不得超过 4×10^{-4} mPa/s。铌合金焊缝中常见的缺陷是气孔和裂纹。采用细电子束进行焊接不易产生裂纹。用散焦电子束对接缝进行预热，有清理和除气作用，有利于消除气孔。

钼合金中加入铝、钛、锆、铪、钍、碳、硼、钇或镧，能够中和氧、氮和碳的有害作用，提高焊缝韧性。钼的焊缝中常见的缺陷是气孔和裂纹。焊前仔细清洗接缝和预热有利于消除气孔。采用细电子束和加快焊速有利于消除裂纹。在焊速为 50 ~ 67 cm/min 时，每 1 mm 厚度的钼约需要 1 ~ 2 kW 电子束功率。

钨及其合金对电子束焊具有良好的焊接性。接头准备和清洗是非常重要的，清洗后应进行除气处理，即在优于 1.33×10^{-3} Pa 的真空度下，将工件加热到 1 370 K，保温 1 h，随炉冷却。预热是防止钨接头冷裂纹的有效措施，预热温度可选为 700 ~ 1 000 K，只是在焊接粉末冶金钨，而且焊速低于 50 cm/min 时才不进行预热。对 W-25Re 合金，预热可提高焊速 170 ~ 25 cm/min，并降低热裂倾向。焊后退火可

降低某些钨合金焊接接头的脆性转变温度，但不能改善纯钨焊缝金属的冷脆性。

2.4.7 金属间化合物

随着材料科学的进步，金属间化合物越来越多地得到应用，如 Ti_3Al、Ni_3Al 等。焊接金属间化合物，必须严格控制焊接线能量，采用较高的焊接速度，避免焊接裂纹和接头脆性。材料冶炼和铸造过程中杂质的控制好坏，对焊接质量的影响很大，因此焊前应对材料成分及力学性能进行复验。

2.4.8 异种金属

异种金属接头的焊接性取决于各自的物理化学性能。彼此可以形成固溶体的异种金属焊接性良好。易生成金属间化合物的异种金属的接头韧性差。对于难以直接焊接的异种金属，可以通过过渡材料来焊接。例如：焊接铜和钢时加入铝衬，可使焊缝密实和均匀，接头性能良好。图5.2-30所示为铜－钢电子束焊接接头。

异种金属相互接触和受热时会产生电位差，这会引起电子束偏向一侧，应注意这一特殊现象，防止焊偏等缺陷。

高铝瓷和铌的密封接头是用电子束焊接而成的。焊前将工件预热到1 300～1 700℃，焊后退火处理。

焊接难熔的异种金属时应尽量降低线能量，采用小束斑，尽可能在固溶状态下施焊。焊后作时效处理。

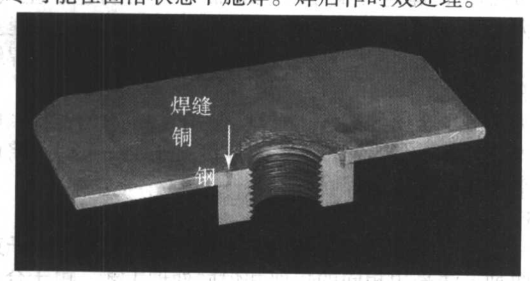


图 5.2-30 铜－钢电子束焊接接头

2.5 应用

随着电子束焊接工艺及设备的发展，特别是近10年来工业应用中对高精度、高质量连接技术需求的不断扩大，电子束焊接在航空、航天、核、能源工业、电子、兵器、汽车制造、纺织、机械等许多工业领域已经获得了广泛的应用。

在能源工业中，各种压缩机转子、鼓筒轴、叶轮组件、仪表膜盒等；在核能工业中，反应堆壳体、送列控制系统部件、热交换器等；在飞机制造业中，发动机机座、转子部件、起落架等；在化工和金属结构制造业中，高压容器壳体等；在汽车制造业中，齿轮组合体、后桥、传动箱体等；仪器制造业中，各种膜片、继电器外壳、异种金属的接头等都成功地应用了电子束焊。

图5.2-31中所示的膜盒是压力传感器的重要元件，原工艺是钎焊，工序复杂（清理⟶镀锡⟶清理焊剂⟶高频焊⟶抽真空⟶封堵）。改用电子束焊接后工序简化为清理⟶焊接。生产效率和产品质量都得到了提高。有的传感元件，要在距真空镀膜的敏感元件仅5 mm处进行电子束焊接，由于热作用小，不影响敏感元件的电阻值。图5.2-32所示的齿轮结构由精加工的零件组合变为电子束焊接组合，焊接变形不超过允许的误差，节省了为加工小齿轮的刀具预留的空间，节约成本，提高效率，减小零件尺寸，这种结构已广泛用于变速箱的制造。



图 5.2-31 膜盒等传感元件

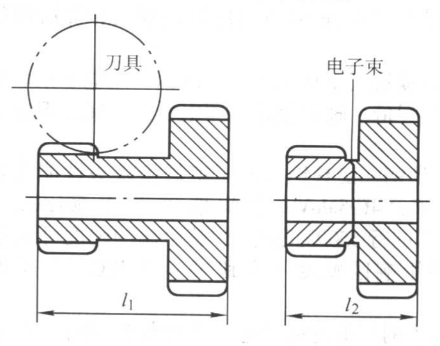


图 5.2-32 齿轮的电子束焊接

图5.2-33示出了飞机发动机结构中电子束焊接的应用，图中1～10都是焊缝分布的不同位置。目前国际上的发动机制造企业都将电子束焊接视为获得高质量产品的先进技术之一。不仅如此，电子束焊接已经扩展到飞机的大型结构制造中，如美国先进的F－22战斗机的机体结构，采用的电子束焊缝总长超过80 m。同样，在航天工业中发动机和结构件都大量采用了电子束焊接技术。

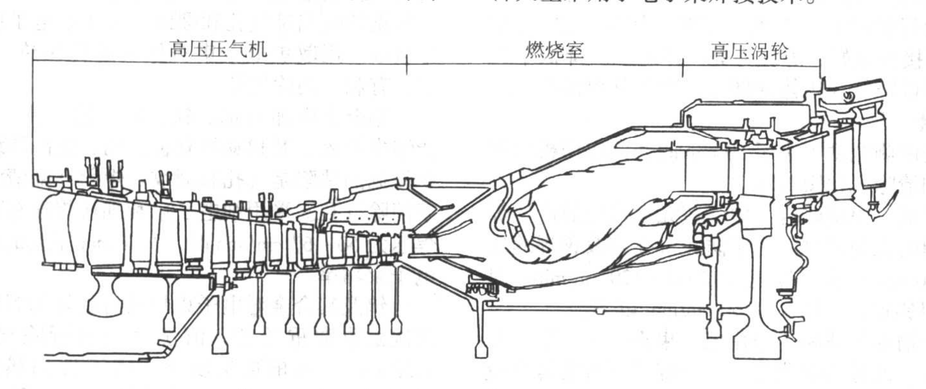


图 5.2-33 飞机发动机制造中电子束焊接的应用

是否高效连续生产，是电子束焊接在机械制造业中能否应用的关键。已有电子束焊接设备安装在生产线中，如齿轮和双金属条带焊接。

高效率地生产双金属条带是电子束焊接的成功应用之



一。如图5.2-34所示，具有两只电子枪的焊接系统，同时将三种金属焊接为一体，根据需要可以将条带从中间剖开，成为两条双金属条带，其最广泛的应用是加工双金属锯条。

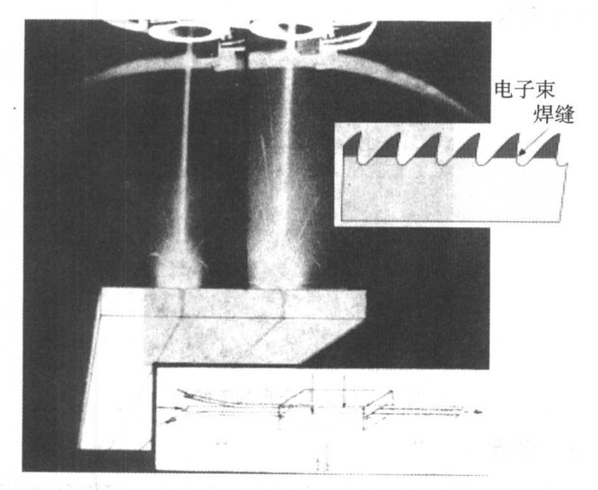


图5.2-34 双金属条带的电子束焊接

电子束焊接的一个重要应用场合是修复磨损或损坏的零件。切掉已损坏的部分；安装和焊接一块相应的材料，经焊后热处理及机加工工序，可以修复零件。由于电子束焊接热输入小，焊接变形很小，修复零件的尺寸精度可以保证。特别是用电子束修复价格昂贵的零件（如航空发动机零件），会带来很好的经济效益。

真空室一直是电子束焊接技术推广应用的障碍，非真空电子束焊接也已开始在工业中应用，适用于薄板高速（>15 m/min）焊接，特别是不等厚接头的焊接。目前世界上建立的最大的非真空焊接工作站的容积为300 m^3（见图5.2-35），电子枪在工作室内运动，在工业电视和焊缝跟踪系统的帮助下进行焊接。尽管非真空电子束不需要真空室，但电子枪仍要在射线防护室或无人车间内工作。

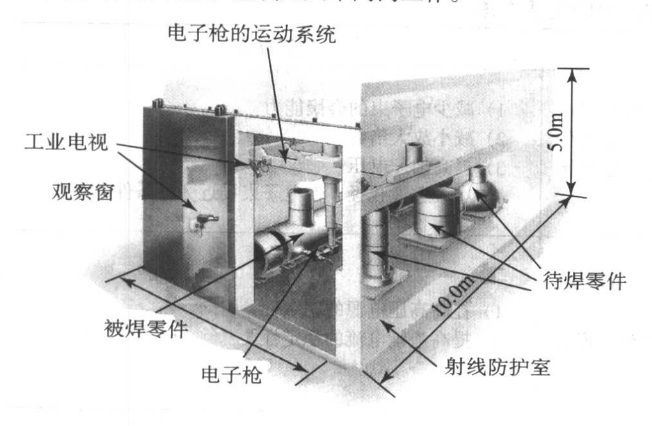


图5.2-35 非真空电子束焊接工作站示意图

2.6 安全防护

在操作电子束焊机时要防止高压电击、X射线以及烟气等。

高压电源和电子枪应保证有足够的绝缘和良好的接地。绝缘试验电压应为额定电压的1.5倍。电子束焊接设备应装置专用地线，其接地电阻应小于3 Ω。设备外壳应用粗铜线接地。在更换阴极组件和维修时应切断高压电源，并用放电棒接触准备更换的零件，以防电击。

电子束焊接时大约不超过1%的电子束能量将转变为X射线辐射。我国规定对无监护的工作人员允许的X射线剂量不应大于0.25 mR/h。加速电压为60 kV以上的焊机应附加铅防护层。

应采用抽气装置将真空室排出的油气、烟尘等及时排出，设备周围应易于通风。

焊接过程中不允许用肉眼直接观察熔池，必要时应佩戴防护眼镜。

3 电子束打孔

早在20世纪50年代，第一台电子束加工设备便是由Karl－Heniz Steigerwald博士发明的电子束打孔机。它主要利用高能、会聚的电子束来熔化和汽化材料形成小孔。当时每个工件只能加工一个小孔，现在随着先进技术的发展和应用，电子束打孔机已成为商业化的设备，打孔效率得到极大提高。

3.1 原理

电子束打孔要求的电子束能量密度达10^7～10^8 W/cm^2，并要求电子束斑点更圆、控制更准确。电子束打孔过程如图5.2-36所示，主要分成四个阶段。

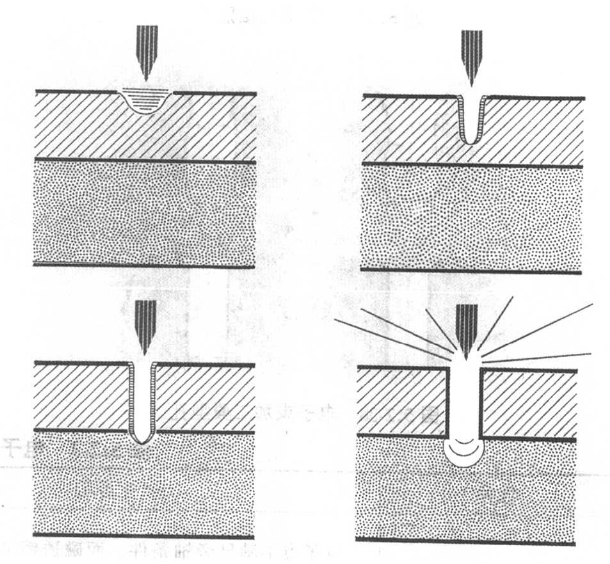


图5.2-36 电子束打孔原理过程

1）电子束与固态材料表层的作用：材料表面被电子束轰击、熔化，并产生汽化。

2）电子束与液态材料的作用：材料熔化后，电子束更易穿透液态材料，并汽化材料形成空穴，电子束进一步深入到材料深层。

3）电子束贯穿材料深度：在电子束作用下，空穴快速扩展，直到贯穿材料。

4）电子束进入背衬材料：电子束进入工件下粘贴的辅助材料，使其急剧蒸发，产生喷射，将空穴周围的残余的熔化材料吹出，形成小孔。

由于电子束打孔采用了高能、可控性好的电子束，在真空下加工，电子束打孔的主要特点表现在如下几个方面。

1）打孔速度高　由于电子束具有极高的能量密度，在采用CNC控制和高速电子束偏转技术后，电子束打孔的速度高，加工网孔最高可达4 000～20 000孔/秒，加工深孔能达到15孔/秒。

2）适宜打深孔　通孔深度最大超过15 mm，孔的深径比≥15:1。

3）打孔质量高　孔壁重熔层最小可达5 μm，表面光滑；孔径误差小（±5%）。

电子束打孔去除的材料也是受到局部加热、熔化和部分汽化的作用过程，尽管大部分熔化的材料被“吹掉”，但仍有 5～10 μm 厚重熔层存在，然而在真空环境下，重熔层不会产生氧化现象，如图 5.2-37 所示。同时通过改变和优化电子束参数，可获得很小误差的孔。从孔的截面形状来看，在束流进入点孔径稍微增大，而在束流引出点，孔稍尖但无毛刺，如图 5.2-38 所示。

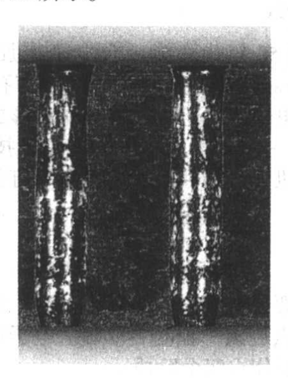


图 5.2-37　孔的低倍照片

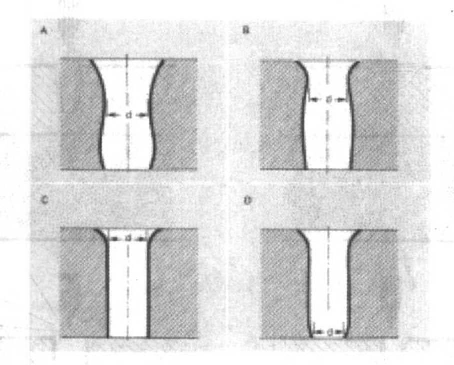


图 5.2-38　电子束加工典型孔

4）加工材料范围广　事实上，电子束可在任何金属材料和陶瓷上加工孔，而不用考虑其硬度和反射率。

5）可打斜孔　倾斜孔的角度最大可与表面成 70°，如图 5.2-39 所示。

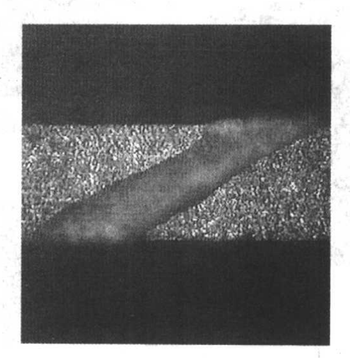


图 5.2-39　电子束加工斜孔

3.2　设备

电子束打孔设备主要由电子枪、真空室、工作台和控制系统组成。与电子束焊接设备不同的是对打孔用的电子枪要求束流品质更高。电子束斑点的椭圆度、束斑直径的一致性及束流能量密度的合理分布是获得高质量孔的关键，为此必须要消除电子束各种像差。在电子枪电子光学系统中主要像差包括球差、色差、像散、畸变和束斑失真等，其产生及校正主要方法见表 5.2-3 所示。只有消除这些像差，才有可能获得良好的打孔质量。

电子束加工中电子枪（如图 5.2-40 所示）的设计采用了双聚焦线圈、合轴线圈、测量线圈、消像散器、偏转与随动系统及法拉弟筒等特殊结构，配合以精确控制的参数保证打孔机的束流品质。

电子束打孔设备的真空室大小取决于打孔零件的尺寸，并采用低真空度（≤2 Pa）下工作。根据不同打孔零件的对称或不对称形状、零件的复杂程度确定工作台的坐标数和运动方式。在电子束打孔设备中，通常有 2 轴、4 轴和 5 轴工作台，如图 5.2-41 所示，2 或 3 个线性轴，2 个旋转轴，配合先进的 CNC 控制系统在实际应用中便能够保证打孔位置

表 5.2-3　电子束加工中的主要像差

像差	产生原因	校正方法
球差	电子束不满足旁轴条件，而磁透镜的径向各点对电子束会聚能力不同，远轴处会聚能力强，电子束成像于高斯平面的前方，在高斯平面上形成放大的模糊圆斑	1）减少电子束的会聚能力 2）减小放大倍数 3）提高加速电压 4）增大透镜孔径，使电子束接近旁轴条件
色差	1）电子束加速电压不稳定，造成电子束速度的波动 2）磁透镜电流不稳定，造成聚焦的变化 上述原因使电子束在不同时间成像位置变化，形成放大的模糊圆斑	1）提高高压电源的稳定性 2）提高透镜电流的稳定性
像散	以机械误差为主，电极、磁透镜孔与光阑等之间的不同轴（位移或倾斜），使电场分布不满足轴对称条件，造成长、短轴间会聚能力不同，形成椭圆形束斑	采用消像散器系统调节椭圆的长、短轴方向的会聚能力，使像恢复圆斑
偏转、畸变和束斑失真	1）电子束偏转受力不均匀而产生扫描图形的畸变 2）线圈非正交位置分布 3）偏转放大器非线性控制 4）外界磁场干扰	1）采用均匀偏转磁场 2）保证线圈位置正交 3）提高偏转放大器线性度 4）采用透镜动态聚焦 5）注意屏蔽和接地，保证电子束免受外界磁场干扰



和角度。

控制系统目前采用PLC和CNC控制系统，PLC系统主要实现设备的逻辑控制功能，CNC系统除了实现工件的多坐标运动功能之外，还需控制打孔参数，其中必须精确控制电子束打孔的脉冲参数。除此之外，控制系统工程还要实时测量束流脉冲的强度和监控束流的打孔位置。

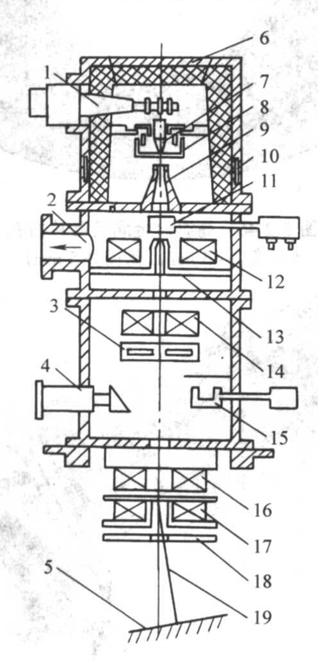


图5.2-40　打孔电子枪示意图

1—高压电缆插座；2—真空管道；3—脉冲传感器
4—光学观察系统；5—工件；6—枪盖；7—阴极
8—控制极；9—阳极；10—校正线圈；11—柱阀
12—磁透镜；13—光阑；14—测量线圈；15—法拉弟筒
16—磁透镜；17—消像散器；18—防护板；19—电子束

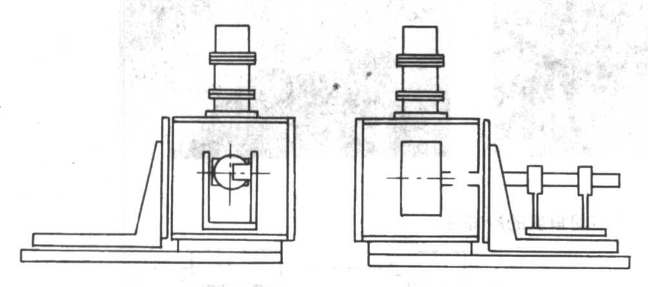


图5.2-41　电子束打孔设备工作台示意图

3.3　工艺及应用

与电子束焊接相比，电子束打孔必须要在加工材料的反面粘贴辅助材料，保证在打孔时辅助材料能急剧蒸发，吹开熔化的材料。因此辅助材料常采用含有高蒸发元素的黄铜粉、硫酸钙等，并具有一定的塑性，并要求其易于浇注、涂覆，打孔后易于清除等特点。打孔材料不同，所用的辅助材料也不同，如在玻璃钢零件上打孔，辅助材料采用HM/Si；在金属叶片上打孔，辅助材料采用HM/M。所以在电子束打孔过程中，对辅助材料的涂覆和去除是必要的，其主要工艺路线为：

吹砂—清洗—涂清漆—涂辅料—固化（空气中或加温固化）—电子束打孔—去除残渣—去除辅料—吹砂—清洗。

为了实现电子束打孔，电子束加工参数的选择是保证电子束打孔质量的关键。电子束打孔的主要参数为脉冲束流和打孔频率，参数的选择与打孔的材料种类、孔深度、孔直径等有关。

1）束流值、脉冲宽度和脉冲个数选择　根据零件材料、孔径大小和厚度来选择，并通过试验确定。当材料厚度和孔径增大时，束流值、脉宽和个数也相应增加。表5.2-4所示电子束打孔的几种典型参数。

表5.2-4　典型电子束打孔参数

材料	厚度 /mm	束流 /mA	脉宽 /ms	脉冲数 /个	最大孔径 /mm	最小孔径 /mm	备注
不锈钢	1.5	20	3.5	1	1.58	0.06	
不锈钢	8.0	100	10	1		0.11	
不锈钢	8.0	100	10	2	1.15		
不锈钢	14.0	100	10	3	0.7		
碳钢	3.0	75	7.5	1	1.0		

2）孔径与孔深的关系　钢和镍基合金打孔时，试验得出孔径与孔深的关系如图5.2-42所示，图示区域可认为是合适的孔深与孔径关系。

3）打孔频率的确定　电子束打孔的频率主要取决于去除材料的体积及孔径和孔深等大小，孔深和孔径增大都会降低打孔的速度。由实际加工经验得出打孔频率与孔的容积关系曲线如图5.2-43所示。例如，对于直径0.1 mm、深0.5 mm的孔来说，每个孔的容积约为0.004 mm^3，其打孔频率可达2 000～3 000孔/秒。而对于孔径0.7 mm、深5 mm孔（孔的容积约为2 mm^3），其加工频率为10～30 Hz。

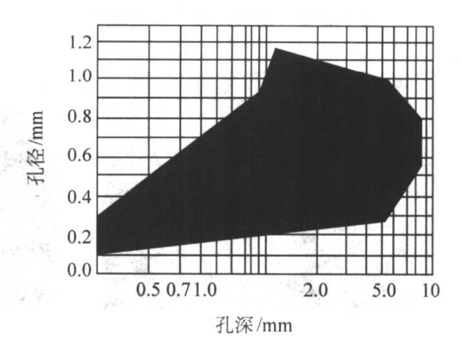


图5.2-42　孔径与孔深范围

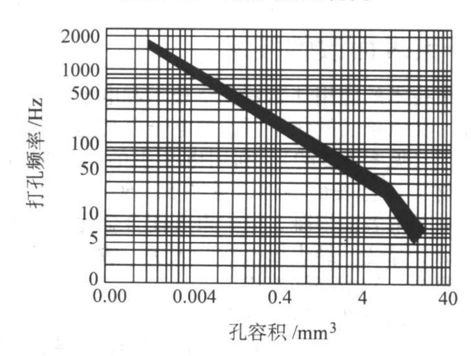


图5.2-43　打孔频率与孔容积关系

电子束打孔技术从最初应用于珠宝、皮革等的小孔加工，已发展到在航空、电子等工业中的批量生产应用中。典型的应用包括玻璃纤维化设备旋转体、离心分离机、卫星燃料分配系统钛板、直升机燃烧室外机匣、发动机叶片等零部件打孔。图5.2-44～图5.2-48是典型的电子束打孔的零件照片。

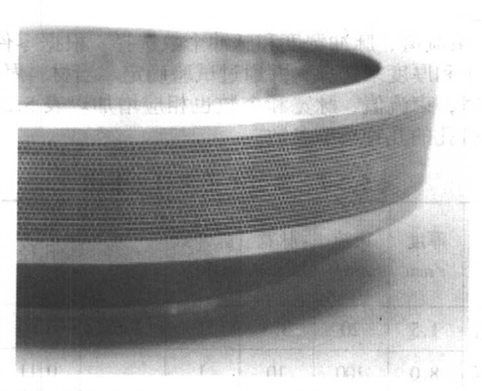


图 5.2-44　用于玻璃纤维化设备旋转部件（25 600 孔，孔径 0.55 mm）



图 5.2-46　高温合金涡轮叶片打孔（厚度 2～3 mm，孔径 0.5 mm）

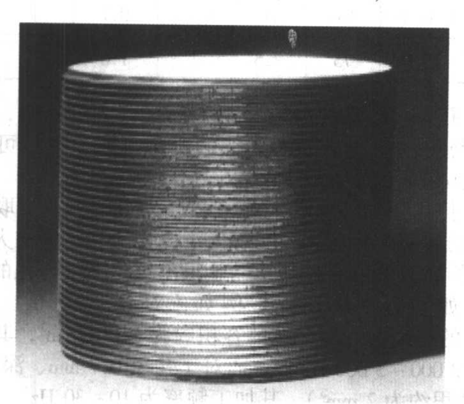


图 5.2-45　塑料分离设备过滤缸

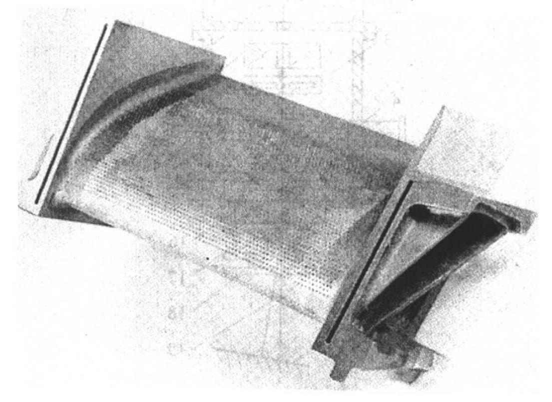
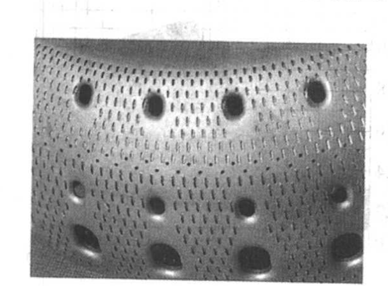
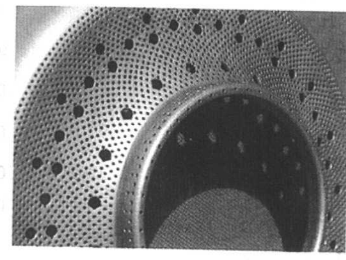
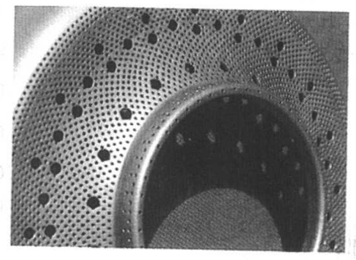


图 5.2-47　钴基合金盘电子束打孔（厚度 1 mm，孔径 0.9 mm）







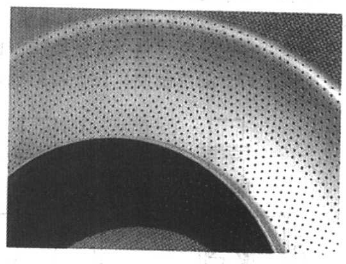




图 5.2-48　直升机燃烧室机匣不同角度的冷却孔

4　电子束表面改性技术

电子束技术的应用伴随着真空技术和电子光学技术的发展而发展。在电磁场的作用下，使电子束高速扫描，可以进行表面加工（见图 5.2-49）。利用电子束的加热和熔化技术还可以对材料进行表面改性（见图 5.2-50），如：电子束表面淬火、电子束表面熔凝、电子束表面合金化、电子束表面熔覆和表面非晶化。经表面改性的表层一般具有高硬度、高强度、耐腐蚀性和耐磨性等优点。

电子束表面改性的特点如下。

1）快速加热淬火可以得到超微细组织，提高材料的强韧性。处理过程在真空中进行，减少氧化等影响。

2）能进行快速表面合金化，在极短的时间内完成热处理几小时甚至几十小时的渗层效果。

3）电子束的能量利用率高，可以对材料进行局部处理，节约能源。表面淬火是自行冷却，节省冷却介质和设备。

4）能对复杂零件的表面进行处理，用途广泛。

5）电子束功率参数可控，因此可以控制材料表面改性的位置、深度和性能指标。

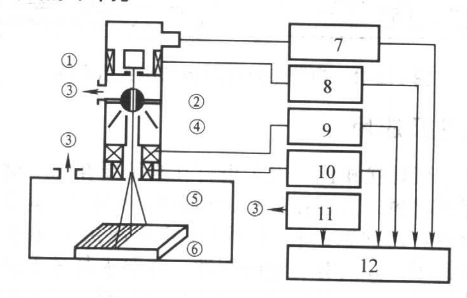


图 5.2-49　电子束表面加工示意图

1—电子枪；2—真空阀；3—真空泵系统；4—光学观察系统；5—工作室；6—工作；7—高压电源；8—调节线圈；9—磁透镜；10—偏转线圈；11—真空泵系统控制单元；12—操作面板

4.1　电子束能量转变

作为能量载体的电子束从电子发生器产生并经加速后，与被蒸发的材料发生碰撞，电子束的电子能量由动能转化成热能，使被蒸发的材料升温、熔化或蒸发，但动能并没有完



全转化成热能，其他的损失包括：背散射电子、二次电子、X射线辐射和热电子，其能量分布如图5.2-51所示。其中背散射电子的影响最大，由其损耗的能量也最多。在二次电子中还包括弹性和非弹性散射的一次电子。材料的熔点越高，绝缘性越好，散射的一次电子越严重，电子损失的能量也随之增加；材料的原子序数越大，轰击引起的二次电子发射越多，因为原子核对核外电子的屏蔽作用增加，能量损失增加。由其他原因引起的能量损失较少。实际上，能量的损失主要考虑电子背散射引起的损失。

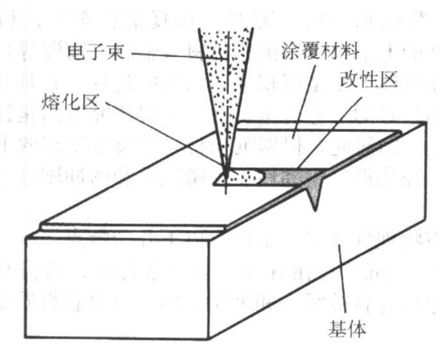


图5.2-50 电子束表面改性

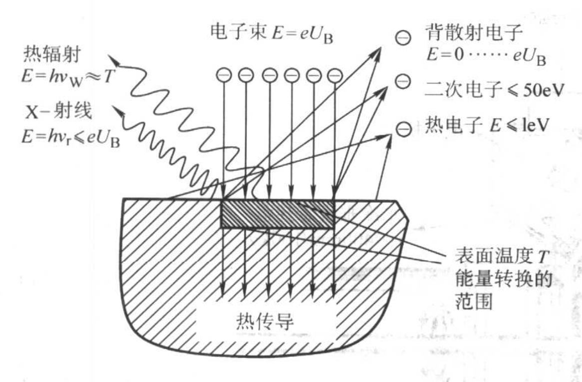


图5.3-51 电子束撞击材料表面时的作用

4.2 电子束表面改性的应用

电子束表面改性技术是在最近十几年迅速发展起来的表面加工技术。由于电子束可以用电磁场灵活地控制，使得电子束加工可以较灵活地调节加热面积、加热区域和材料表面的能量密度，并且电子束的能量利用率更高，可以高达95%。但是，由于真空室的限制，给许多零件的应用带来不便，所以电子束表面改性技术并没有像激光表面改性技术一样得到广泛地应用。

根据材料的表面层熔化与否，电子束表面改性可以分为两种方式：固相加工－表面淬火（硬化）、液相加工－表面熔凝、合金化、熔覆和非晶化。

4.2.1 电子束表面淬火

利用电子束加热材料表面使其温度超过奥氏体转变温度通过其内部冷态的金属进行自淬火达到表面淬火的目的。由于加热能量密度高、速度快、温度梯度大，冷却速度快，相变过程中钢铁材料的奥氏体化时间短，奥氏体晶粒来不及张大，可以获得超细晶粒组织而使表层拥有较高的强硬性（如图5.2-52）或得到较高的耐磨性。心部由于没有受到加热温度的影响，可以保持其原有的性能，如较好的塑性和韧性。

4.2.2 电子束表面合金化

根据所需将具有特殊性能的合金粉末涂覆在金属表面上，利用电子束加热熔化进行表面合金化处理，虽然时间较短，但是在控制好工艺参数的条件下可以使变成液体的各种合金元素与基体元素得到充分混合并重新分布凝固，获得所需的表面结构（如图5.2-53）和性能，满足其耐磨、耐蚀和耐热等要求。

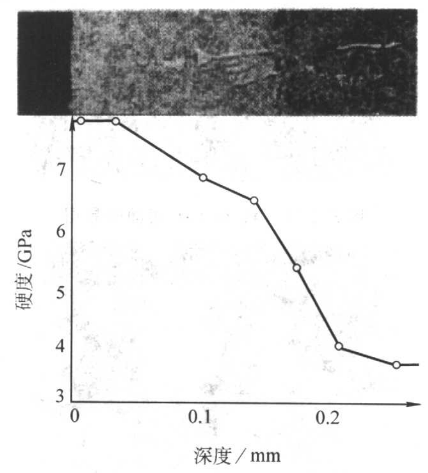


图5.2-52 NC10钢的电子束表面淬火层及硬度随深度的变化关系

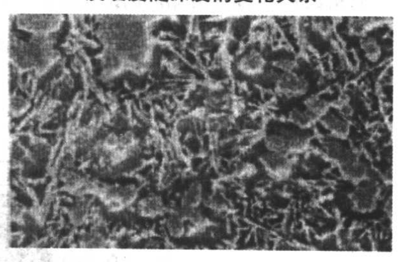


图5.2-53 CrB在Ti6A14V表面的电子束合金化的微观组织

4.2.3 电子束熔覆

利用电子束熔化技术，根据需要向基体表面预先涂覆，并将其材料熔化，在表面形成具有某些特殊作用的覆盖层（如图5.2-54）。与表面合金化不同，熔化层必须准确控制防止涂覆层与基体过分地混合熔融而得不到所需要的涂覆层，得不到满足需要的涂层。

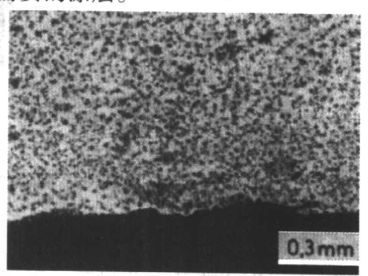


图5.2-54 电子束表面熔覆的微观组织

4.2.4 制造非晶态表层

将电子束能量密度提高，使加在基体表面上的能量可以快速熔化表面层而形成小熔池，其他部分受热较小，在冷基体的作用下可以获得较快的冷却速度。表层熔化深度为0.025 mm时，冷却速度可达10^6℃/s，这样可以在材料的表面形成良好的非晶层，该组织具有高的耐腐蚀和抗疲劳的性能（如图5.2-55）。

4.2.5 电子束表面熔凝

将所需材料的表面重新熔化，在冷基体的作用下快速凝固而形成与基体的组织结构和性能不一样但成分一样的表面层，提高表面的耐磨性。与非晶化不同，表面熔凝的冷却速度相对较低，并且获得的组织一般为铸态（如图5.2-56）。

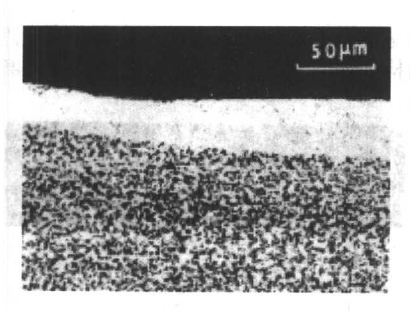
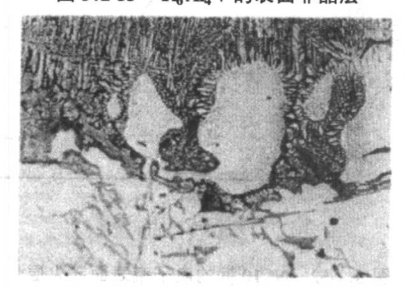


图 5.2-55　Ti_6Al_4V 的表面非晶层


图 5.2-56　AlSi 合金熔凝的微观组织

电子束表面加工技术可以改善材料表面性能以满足材料表面的摩擦磨损、耐腐蚀和高温使用性能等要求。尽管电子束表面改性技术在各行各业中得到应用，但该技术的发展还不成熟，需要对其做进一步的研究。

5　电子束物理气相沉积

5.1　概述

电子束物理气相沉积技术（Electron Beam Physical Vapor Deposition，简称 EB-PVD）是指：在真空状态下，利用具有高能量密度的电子束轰击沉积材料（金属、陶瓷等）使之熔化蒸发并在基体上凝结沉积形成涂层的过程。它具有很高的沉积速率和较好的工艺可重复性。主要研究方向是针对热障涂层（TBCs）的研究。根据沉积材料性质及工艺的不同可以使涂层具有隔热性、耐磨性、耐腐蚀性和耐冲刷性等不同性能。

电子束物理气相沉积工艺有以下几个特点：

1）涂层的沉积是在真空状态下进行的，这将有利于防止基体与涂层材料被污染和氧化，因此可以获得质量较高的涂层；

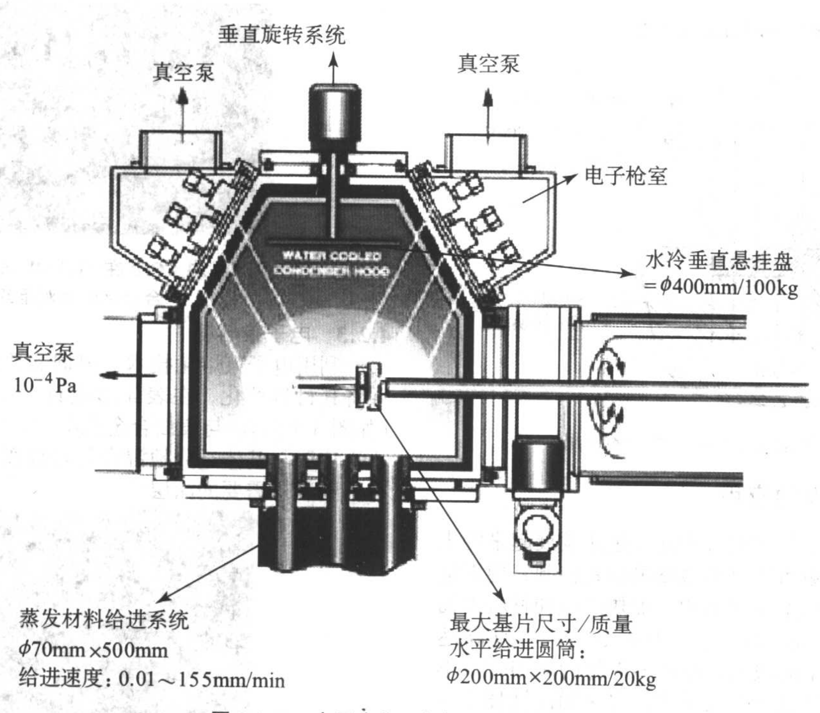


图 5.2-57　电子束物理气相沉积设备示意图

2）选择较好的工艺参数及工艺过程，可以得到与蒸发材料的物相和元素含量基本一致的涂层；

3）涂层与基体之间具有较高的结合力；

4）它具有很高的沉积速率和较好的工艺可重复性；

5）由于电子束具有很高的能量密度，它可以熔化蒸发一些难熔及蒸气压很低的材料（如金属钽、钨、钼等），这是其他加热方式很难做到的。

表 5.2-5 是几种工艺手段制备的涂层主要性能对比。

5.2　电子束物理气相沉积设备

电子束物理气相沉积设备一般包括真空室，电子枪，工件运动系统，坩埚；棒材给进系统；抽真空系统；水冷系统；高压电源及控制系统。图 5.2-58 为电子束物理气相沉积设备实物照片。

表 5.2-5　双层 TBCs 涂层沉积工艺及比较

序号	沉积工艺	涂层结合力	隔热性能	成本
1	喷涂 + 喷涂	差	好	低
2	喷涂 + 电子束物理气相沉积	较好	较好	中等
3	溅射 + 电子束物理气相沉积	好	较好	中等
4	电子束物理气相沉积 + 电子束物理气相沉积	好	较好	较高

由于被蒸发材料必须被加热至熔化状态，部分材料（如陶瓷）熔点很高，很难找到一种材料作为盛蒸发材料的坩埚，即使有这种材料在机械加工上也很难得到所需要的形状，在这种情况下，水冷铜坩埚就应运而生了，它是用铜作



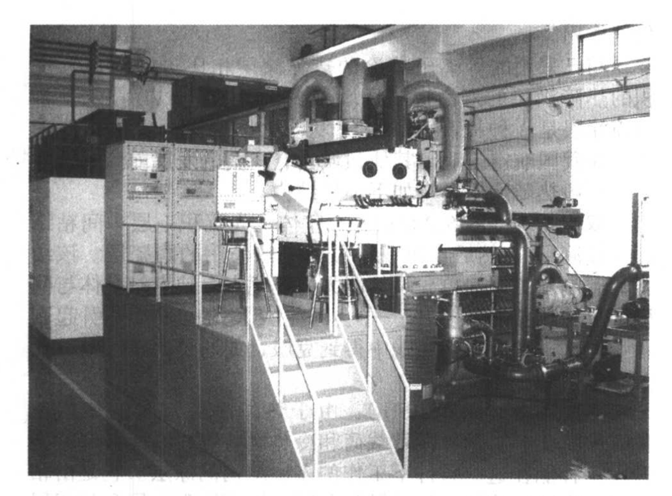


图 5.2-58 电子束物理气相沉积设备

为坩埚材料直接与熔池接触，因为铜的热导率很高，在铜的外侧用恒温的循环水可以将多余的热量迅速带走，从而保证坩埚可以正常使用，图 5.2-59 为这种水冷铜坩埚的结构示意图。

电子束物理气相沉积设备的真空系统比较复杂，一般由主真空室、枪真空室、预真空室、辅助的管道系统及真空泵组成。主真空室如图 5.2-57 所示，其中的梯形框就是主真空室，也就是设备的工作室是整个真空系统体积最大的部分，工件的预热及材料的蒸镀都在这里完成，枪真空室在主真空室的两侧，主要放置电子枪，每个室有三把电子枪，上面一把枪用于工件的预热，下面两把枪用于材料的蒸发，由于电子枪工作时需要相当高的真空度，因此，每个枪室都有一到两个扩散泵对其单独抽真空，保证电子枪工作时需要的真空度；预真空室是一个体积较小的真空室，它主要是为了提高工作效率而设，如在从事小批量单一零件生产时，可以在保持主真空室较高真空度情况下，在预真空室中装卸或更换零件，这样就可以大大地节省时间，提高工作效率；辅助的管道系统将真空室的各个部分与真空泵联系在一起，并在管道上装上真空阀门，方便对真空系统的控制。

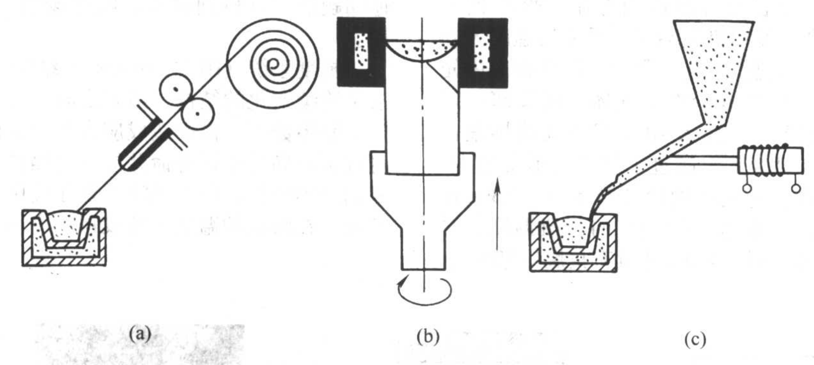


图 5.2-59 水冷铜坩埚的结构示意图

水冷系统是电子束物理气相沉积设备的重要组成部分，由于电子束具有相当高的能量密度，一般使用 $10^8 \sim 10^9$ W/m^2 的能量密度进行蒸发，而全部的能量又不可能都作用在蒸发材料和零件上，因此电子束直接或间接作用的地方都需要进行冷却，包括主真空室、枪室、预真空室及蒸发材料给进系统需要进行水冷。

电子枪是电子束物理气相沉积设备的关键部件，它在结构设计上有许多种形式，主要有：直式（皮尔斯枪），如图 5.2-60（a）所示；电磁偏转式又包括电偏转环形枪，如图 5.2-60（b）所示，磁偏转 e 形枪，如图 5.2-60（c）所示。由于聚焦线圈和偏转线圈的应用使直式电子枪的使用非常方便，它可以得到 100 kW/cm^2 以上的高能量密度，而且易于控制调节，因此目前所用的电子束物理气相沉积设备多采用皮尔斯枪，它的主要缺点是体积大、成本高，枪体由灯丝、阳极、阴极、聚焦线圈和偏转线圈等组成，灯丝处于负高压。电子枪的使用需要注意两点：第一，为了维持所需要的蒸发速率，在功率一定的条件下，一般采用低电压和高电流，而不能选择高电压和低电流的工作方式，并保证焦斑有一定的大小，电压越高对高压电源的要求越高，同样的功率条件下，束流的稳定性也越差，并且伴随着电压的升高，各种射线辐射也随之增强，这将对整个系统的辐射防护提出更高的要求；第二，对蒸发材料，特别是金属材料，由于良好的热传导，水冷铜坩埚良好的冷却效果将对蒸发速率产生重要的影响，整个熔池从中心区域到坩埚壁的温度将呈梯度分布，并且随着电子束功率的升高，温度梯度将随之升高，温度梯度过大，将会使熔池产生飞溅，对蒸发过程产生破坏，因此，提高蒸发速率并不意味着一味地提高电子束功率，而应在减小或维持坩埚温度梯度的前提下，加大对坩埚的扫描面积使沉积材料受热更均匀。

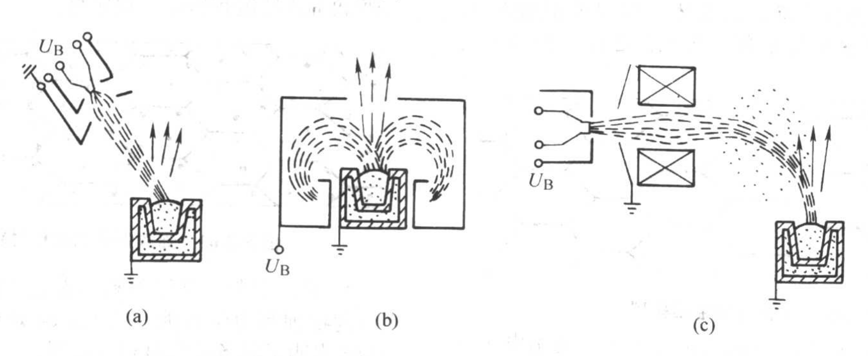


图 5.2-60 几种类型电子枪示意图

高压电源分为阴极加速高压电源和灯丝电流电源两部分。一般EB－PVD电源的聚焦加速电压为20～25 kV，电子束流为2～3 A。将用于熔炼的电子枪进行改进，可获得供大面积蒸发沉积用的电子枪，这种枪对聚焦加速电压的精度要求不高，并且可实现多把枪共用同一电源，其输出特性为10 V/80～150 A，在一定的加速电压下，电子枪束流的大小是通过改变灯丝电流进行控制的。为保护设备及操作人员的安全，设计并安装了变压器输入端三相平衡度监测及过载保护的电路系统。总之，EB－PVD设备电源具有高效、安全、稳定的特点。

5.3　电子束物理气相沉积的应用

5.3.1　涂层技术

电子束物理气相沉积技术在涂层方面的应用主要是热障涂层的制备。热障涂层（TBCs），又称隔热涂层，是广泛应用于航空发动机的热屏蔽涂层。TBCs的研究始于20世纪40年代末，于60年代初应用于JT8D发动机燃烧室内壁。如果热障涂层应用于燃气涡轮发动机，可以显著提高发动机的功率、降低发动机的油耗、延长部件的使用寿命。80年代末随着发动机推重比的提高，发动机热端部件承受的温度大幅度提高，由于材料本身的承温能力受到限制，因此在应用先进冷却技术的同时，TBCs作为减少冷却气体、延长部件寿命的一种重要手段而受到重视。进入90年代发动机推重比达到了10，此时涡轮进口温度大大超过了材料的承受能力，涡轮叶片的正常工作除得益于先进的冷却技术外，TBCs技术也发挥了重要的作用。如果考虑燃烧室的峰值温度，对TBCs的隔热效果要求更高。同时TBCs还具有抗腐蚀和抗氧化的作用。

与已采用的等离子喷涂的热障涂层相比，EB－PVD沉积的热障涂层的寿命提高近8倍，利用EB－PVD技术制备热障涂层是一种提高涡轮燃气发动机推重比的先进制造方法，在我国航空工业等其他领域具有广阔的发展前景。

一般热障涂层具有如下三种结构。

双层系统（图5.2-61a）：在基体上先沉积一层中间粘结层（过渡层），然后再沉积一层起隔热作用的陶瓷层。该结构具有制备工艺简单，耐热能力强等优点。缺点是基体与陶瓷两层的热膨胀系数不一样会产生较大的应力，易引起剥落。但这一缺点已在实践中得到克服，如通过调整层厚、孔隙率等措施。

多层系统（图5.2-61b）：由于热障涂层复杂的使用条件，如氧化、腐蚀、多重载荷和冷热疲劳等，因此人们希望开发一种能在这一条件下工作的多层结构的涂层。它是由粘结层、陶瓷隔热层、氧扩散阻碍层、抗腐蚀阻碍层和封闭层等多层结构组成。这种多层结构可以防止氧原子的侵入和避免SO_3、SO_2和V_2O_5的侵蚀。由于多层结构的制备工艺等其他问题还没有得到解决，因此该结构在实践中没有得到应用。

梯度系统（图5.2-61c）：该结构是从金属到陶瓷隔热面层呈连续变化的结构，两者之间不存在明显的界面，避免因热膨胀系数不一样而造成应力集中而使涂层剥落，这种结构可以保证满足设计寿命并能满足隔热效果，但由于高温氧化机制尚不清楚，所以该涂层现在应用于温度相对较低的工作环境，在较高的温度下还没得到应用。

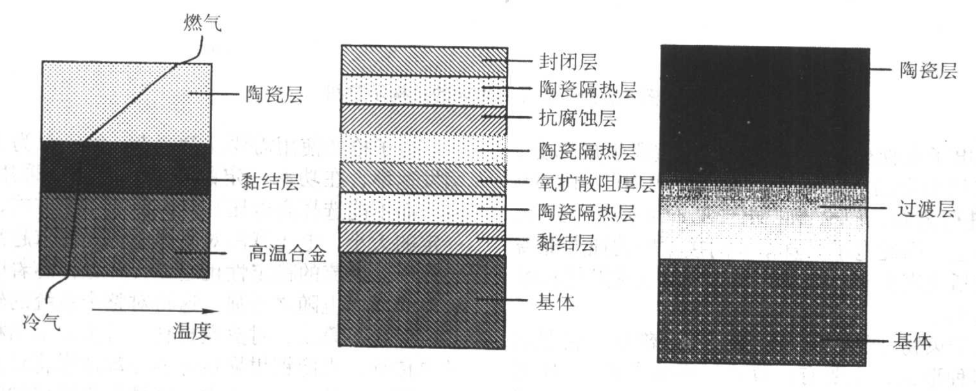


图5.2-61　几种热障涂层的典型结构

5.3.2　新型材料制备

EB－PVD可用于制备各种材料。

1）单相材料　如Cu、Al等，利用电子束加热Cu或Al的棒料（Ingot）使其蒸发并沉积到基体上得到单相的涂层，或对其进行精炼得到高纯度金属。图5.2-62是这种材料的金相模型。

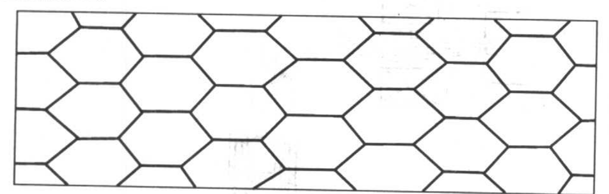


图5.2-62　单相材料金相模型

2）两相材料图　如Cu－Mo、Cu－Nb等，利用电子束同时加热放在两个坩埚内的棒料使它们同时蒸发，由于材料的特性不同可以得到图5.2-63所示弥散强化的两相材料。这种加工方法可制备难以用其他方法制备的材料，如为美国某公司生产的300 mm×200 mm×17 mm磁控溅射靶材，一般需要48 h连续沉积做成一块靶材。

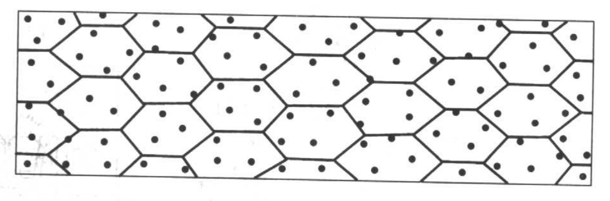


图5.2-63　弥散强化的两相材料金相模型

3）微层材料　微层材料具有巨大的发展潜力，它具有很好的物理和力学性能。图5.2-64是微层材料的结构。图5.2-65表明了制备微层材料的过程。

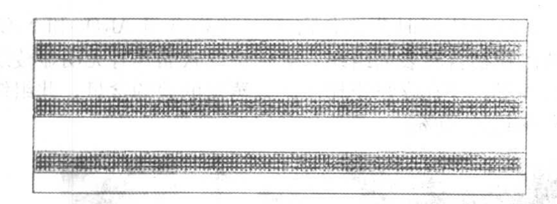


图 5.2-64 微层材料的金相模型

基体温度、基体的旋转速率、材料成分以及两种棒料的蒸发速率等参数决定了微层材料微层的厚度、成分和结构，也就确定了其性能。表 5.2-6 比较了在 20℃和 1 000℃时高温合金 ZHS6K 和一些 Ni 基合金的微层材料的力学性能。这些微层材料的厚度大约在 1.2 ~ 1.5 mm 之间。1 000℃时合金/NbC 及合金/Mo 微层材料的力学性能接近并都超越了 20℃时多组分铸造合金的性能。新的超高温、超强度的微层材料也即将出现，如合金/金属间化合物、合金/碳化物、合金/氧化物及氧化物/氧化物等等。

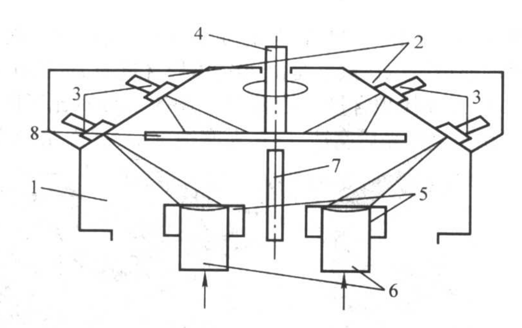


图 5.2-65 微层材料制备

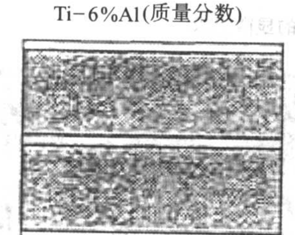
1—真空室；2—枪室；3—电子枪；4—垂直旋转系统；5—水冷铜坩埚；6—沉积棒材；7—垂直铜挡板；8—旋转基板

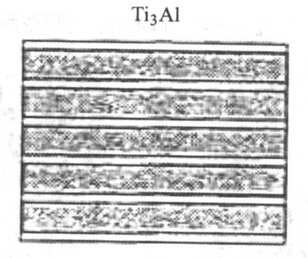
表 5.2-6 高温合金的力学性能

不同条件下材料的力学性能 / 合金成分（质量分数）/%	20℃			1 000℃			0.1%h^{-1}
	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	ξ /%	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	ξ /%	σ /MPa
Ni - 10.5Cr - 5W - 5Al - 4.2Mo - 4Co - 2.5Ti - 0.11C（Zh56K）	880	1，000	2.5	300	526	2.0	190
Ni - 18Cr - 4Al	530	910	24	45	46	43	—
Ni - 18Cr - 6Al - 9Mo - 0.44Al2O3	600	650	2	80	120	5	60
Ni - 12Co - 18Cr - 4Al - 7Mo	970	1，300	15	55	67	20	50
Ni - 12Co - 18Cr - 4Al - 2.4NbC	1，060	1，350	8	58	72	94	40
Ni - 16Cr - 5Al/10.%NbC（体积分数）(2.8 mm)①	720	1，130	10	110	200	7	90
Ni - 6Al - 12Mo/23%Mo(体积分数)(3.5 μm)①	900	1，300	3	200	400	4	140

① 微层厚度。

图 5.2-66 表明了 Ti - 690Al、Ti_3Al、TiAl 微层材料结构的转变过程。这几种材料的 Ti、Al 体积比分别为 9.4、3.2、1.0。微层材料被加热至铝熔点温度以上（700 ~ 800℃）引起铝的熔化并发生了物理化学反应。这种微层破坏的方法有巨大发展潜力。这种微层材料层间结合部位的结构实际上与焊接材料的结合区没什么区别。在厚度方向上有梯度组分的微层涂层可以被用在不同材料的连接和有内部通道结构的生产上，如叶片和风扇的修理上。





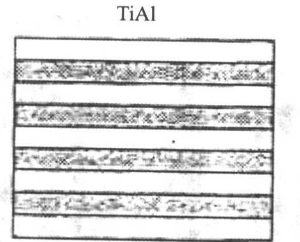


图 5.2-66 Ti - 6%Al（质量分数）、Ti_3Al、TiAl 微层材料结构的转变过程

4）微孔材料 图 5.2-67 表明了微孔材料的金相结构模型。目前有两种方法能获得微孔材料，一种是主要物质加无机盐同时沉积，然后将无机盐去除的办法，一般是氯化物和氟化物，还必须满足主要物质与无机盐不发生反应；另一种是利用大小颗粒的阴影效应。图 5.2-68 制备微孔材料最新的方法：主要物质加无机盐同时沉积，无机盐不需要去除，如 Al_2O_3 + NaCl 同时沉积，将基体加热到 1 173℃，由于 NaCl 的熔点是 1 073℃，所以 NaCl 不会凝结并二次蒸发，这样形成的微孔材料就不需要进行后处理了。微孔材料可用于制作汽车燃料电池，这种电池是环保型的并且效率高，可达 50% ~ 60%。

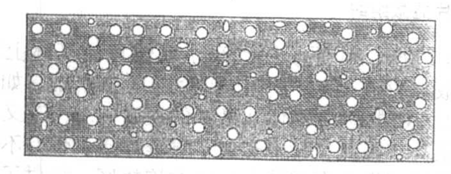


图 5.2-67 微孔材料的金相模型

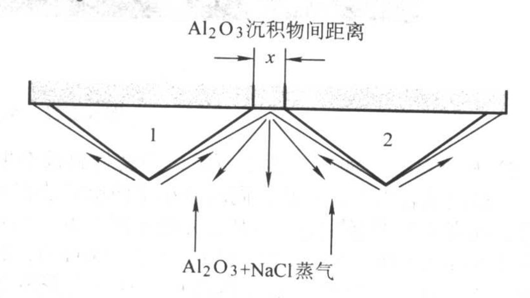
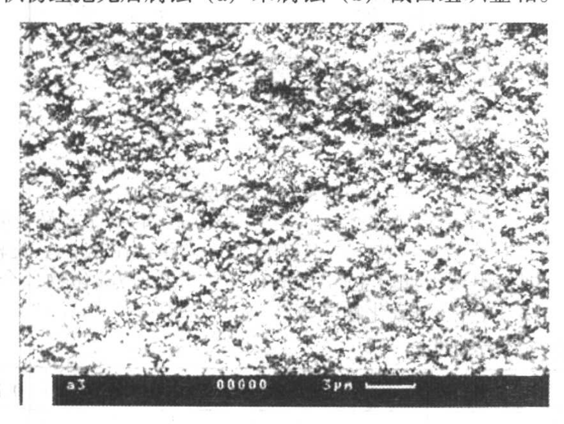


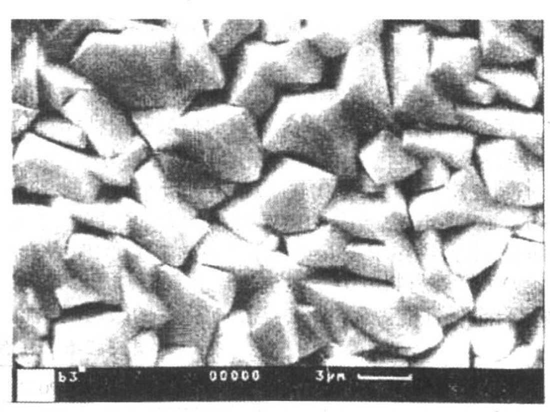
图 5.2-68 微孔材料制取原理图



图 5.2-69 对比了 7% Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 沉积物表面沉积和冷凝的显微组织，蒸气是由 70%体积含量的 7% Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 和 30%体积含量 NaCl 组成。图 5.2-70 对比了图 5.2-69 中沉积物经抛光后腐蚀（a）未腐蚀（b）截面组织金相。图 5.2-71 表明同时蒸发各占 50%体积含量 Al_2O_3 和 NaCl 得到的沉积物自然表面组织，氧化铝柱状晶具有无明显棱线的柱状外形，气孔含量正比于同时蒸发的盐的含量，此组织的气孔率超过 50%。

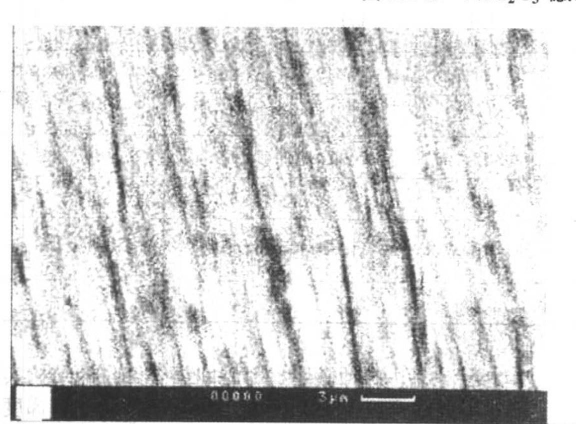


(a)

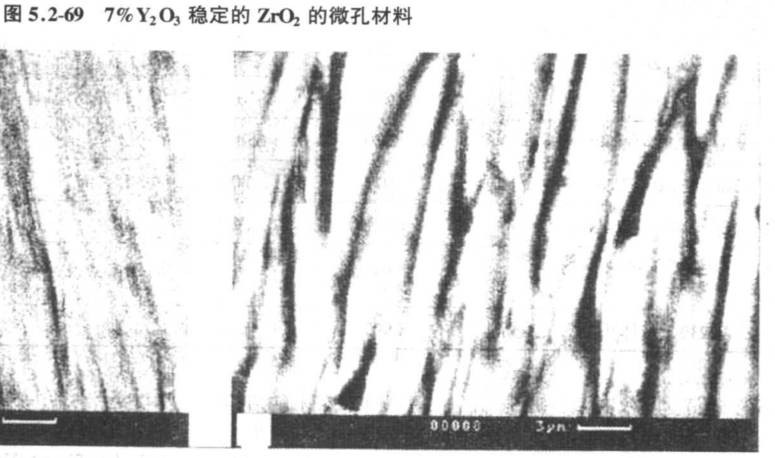


(b)

图 5.2-69　7% Y_2O_3 稳定的 ZrO_2 的微孔材料

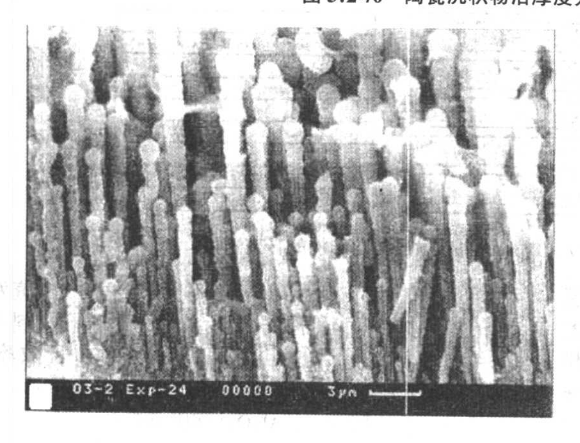


(a)

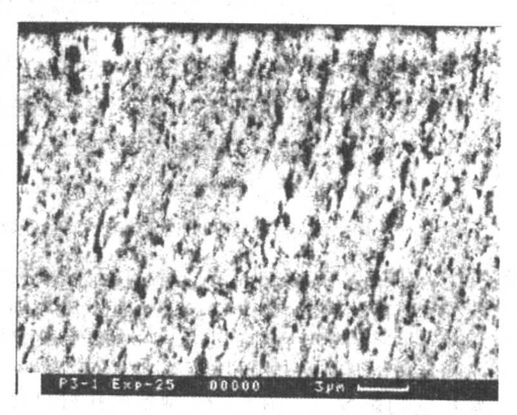


(b)

图 5.2-70　陶瓷沉积物沿厚度方向的横截面的显微组织



(a)



(b)

图 5.2-71　Al_2O_3 + NaCl 沉积物切片显微组织

5）梯度材料　如图 5.2-72 所示，梯度材料没有明显的界面，层间结合力得到提高，同时减小了两层间热膨胀系数差异，提高了抗剥落性能。其制备方法如图 5.2-73 所示，一个直径 64 mm，高 3.5 mm，重 30 g 的药片（tablet），其组成为 Al、Cr、Al_2O_3，用电子束加热药片，Al 首先蒸发并具有最高的蒸气压，Al 原子撞到高于其熔点的基体上，不会凝结并以液态存在同时与基体和涂层互相作用。如图 5.2-74 所示，Al、Cr 扩散到基体几微米的深度，Al、Cr 又在铁中的溶解度很高，因此，一个类似于铜锌焊接、带有不明显的液相微层的过程发生在基体与涂层的连接区，提供了一个很高



的连接质量。

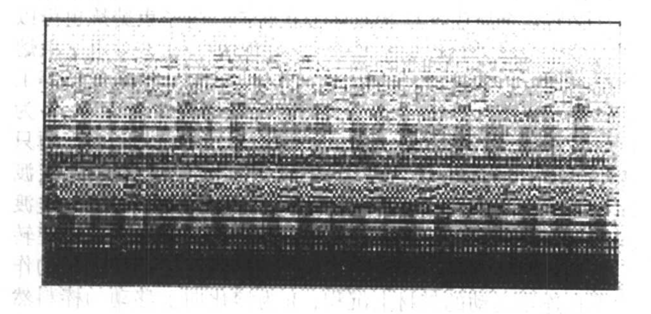


图 5.2-72　梯度材料的金相模型

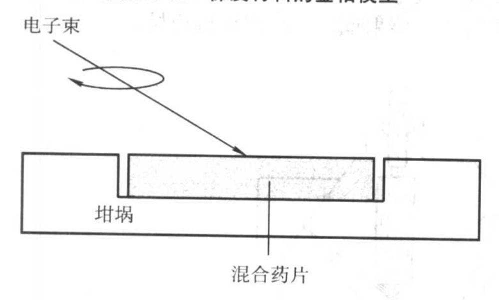


图 5.2-73　Al、Cr、Al_2O_3 混合药片沉积

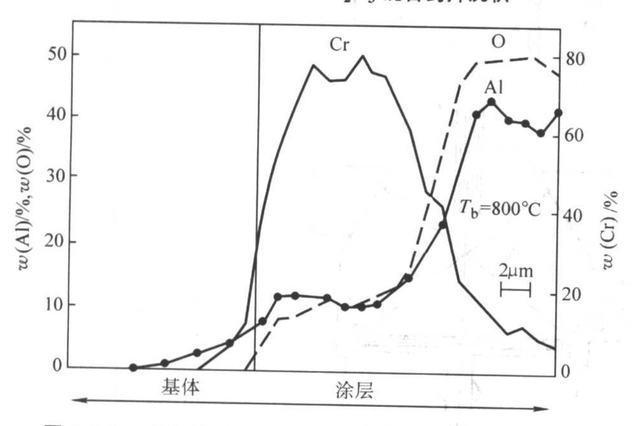


图 5.2-74　6Al－32Cr－62Al_2O_3 混合药片沉积涂层成分曲线

6　电子束熔炼

1905 年电子束熔炼进行了第一次尝试，成功地熔化了难熔金属钽。但是当时无论是真空技术还是电子技术都很不成熟，因此影响了电子束熔炼技术的进一步发展。

电子光学在 20 世纪中叶飞速发展，使获取和形成可靠的电子束成为可能。电子枪产生的自由电子在静电场中被加速，借助于磁场和电场实现电子束的聚焦和偏转。

电子束熔炼的工艺流程将作为金属和合金精炼热源的电子束得到了最大程度的利用。因此，随着更大功率、可靠的电子枪，供给组件，真空组合件的产生，真空物理化学过程新资料的积累，电子束熔炼工艺不断提高。固体毛坯熔炼工艺在现代工业中取得了更广泛的应用。在精炼难熔金属时，带有毛坯垂直进给机构及多种类型和数量的电子枪的使用使得电子束熔炼工艺得以飞速发展。

所熔坯料借助于进给机械垂直进入熔炼区，在电子束的轰击作用下实现了坯料端面的加热和熔化，熔化后的金属流到水冷铜质结晶器中，该结晶器用电子束的偏离部分来加热，如图 5.2-75 所示。带有加速阳极的电子枪的应用，可以在电场形成的自由空间里完成熔炼。5.2-75a 的特点是独立的两把电子枪配合熔炼，而 5.2-75b 则是把枪布置到枪室中，然后配合熔炼，这样的特点可使熔炼过程中高压放电的可能性降至最低，同时增大了阴极的寿命。并降低了由于其中某把枪失灵而导致熔炼过程中止的概率。

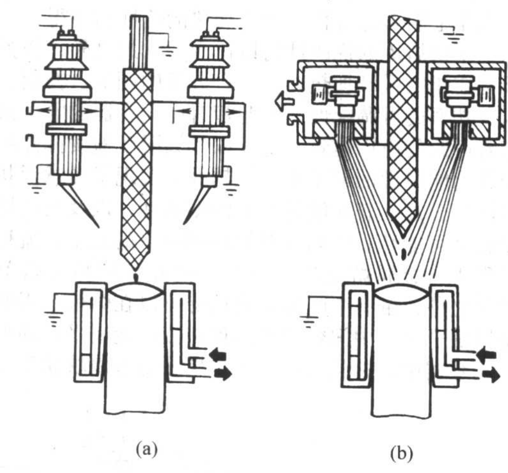


图 5.2-75　棒料水平进给方式的电子束熔炼

另一种熔炼方式是电子枪垂直放置，毛坯两侧进给（如图 5.2-76 所示），旋转的电子束被聚焦到结晶器的熔池表面及给进棒材伸进结晶器部分。带有加速阳极的电子枪可以在自由电场空间内实现熔炼。

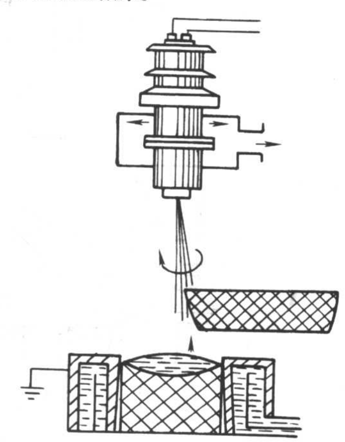


图 5.2-76　棒料垂直进给方式的电子束熔

此外，带有中间容器的电子束熔炼（如图 5.2-77 所示）

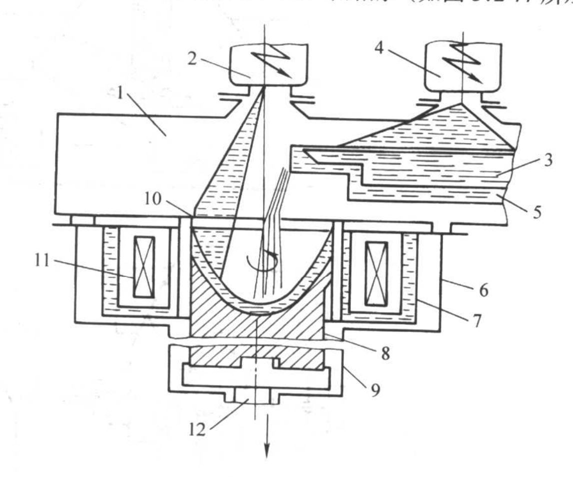


图 5.2-77　带有中间容器和借助于运动磁场旋转来精炼的电子束熔炼示意图

1—真空室；2、4—电子枪；3—中间容器；5—液态金属；6—套管；7—水冷铜结晶器；8—铸锭；9—进给机构；10—电子束；11—电磁线圈；12—垂直下拉丝杠

也是真空精炼金属和合金的方法之一。图 5.2-77 为液态金属在圆形扫描电子束加热下滑入结晶器中形成金属锭材的示意图。依靠金属熔炼过程中独立加热的特性而使得带有中间容器的电子束熔炼的优越性得以体现。除此之外，作为热源的电子枪在指定区域加热时，具有灵活的调节、控制、操纵性能以及功率的可调配性。因此带有中间容器的电子束熔炼方法有着广阔的应用前景。它可以最大限度地发挥棒料熔炼过程中作为能量源的电子枪的优越性，实现了任意形状加热区的可能性，加热表面能量分配的准确性，以及实现熔炼过程自动化的可能性。中间容器的应用可以简化工艺流程。在这个过程中，金属熔融物的熔炼、精炼和结晶可以单独实现。除此之外，带有中间容器的精炼可以在熔炼过程中形成液态金属的合金。中间容器可实现将液态金属平行地分灌入几个结晶容器中，并且可以获取多层平整金属块状钢锭，以及各种形状的铸件。

除熔化金属生产柱状及平板状材锭，电子束熔炼也可以实现熔化金属进行逐层结晶、浇注和喷射等工艺。电子束熔炼技术还可以实现材料的精炼、制粉、轧制、铸造成形等工艺过程。如图 5.2-78a ~ i：a 为竖直毛坯熔进柱状模具；b 为用过渡坩埚熔炼竖直坯料成柱状铸锭起精炼作用；c 为两只水平毛坯由过渡坩埚熔进柱状模具；d 为将水平坯料用过渡坩埚或垂直坯料熔进旋转模具；e 为熔化竖直棒料进入过渡铸勺然后浇灌模具；f 为熔化向上进给的棒料，在上面旋转主板上逐层凝结；g 为熔化向上进给棒料，在冷却辊子的作用下在连续运动的带材上沉积；h 为熔化向上移动的棒料然后向上挤压成形拉出带材；i 为熔化向上进给棒料，在高速转盘的作用下溅射或快速凝固获得粉材。

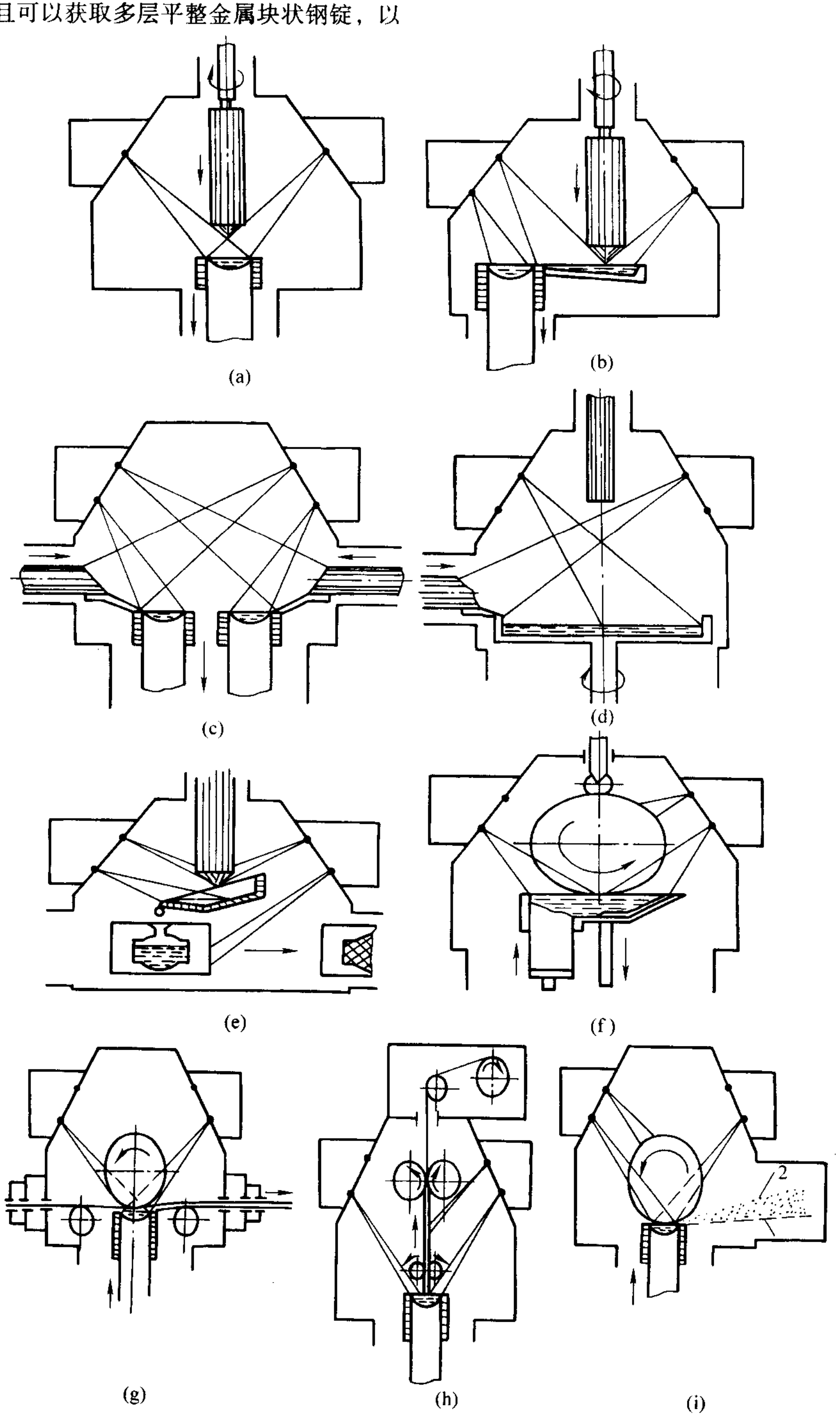


图 5.2-78　设备可实现的一些工艺过程



7　电子束辐照技术

电子束是一种辐射，它是一束经过电磁场加速的电子流，粒子能量远高于紫外光，可以使空气电离。电子束辐射由于具有较高的能量效能与能量密度，可利用电离辐射（电子加速器产生的粒子束）与物质或材料相互作用产生的物理、化学或生物学变化，对物质或材料进行加工处理。由于电离辐射中的一个粒子能摧毁数个分子，导致原子中的价电子处于高能态水平（激发态），或者使价电子从一个原子或分子中电离出来，从微观上改变了物质原子的状态，以及分子的化学结构，从而在宏观上奠定了物质加工、特别是材料改性的基础。因而可以用作物质材料的特殊加工手段，实现常规加工（机械加工、热加工、电加工、化学加工等）难以胜任的加工任务。

电子束辐射加工技术的主要特点是：

在常温下对物体进行处理，对物质无损伤、能耗低；

可深入到被辐照物的内部进行“工作”，而且不会带来任何残毒和废物；

能量集中，能量大小可调节，可以定向辐照，控制方法简便，适合产业化、规模化生产；

适用范围宽，成本低，生产率高，射线利用率高，关机后没有辐照污染，安全防护性好。

由于电子束辐射加工具有以上技术特点，这种加工方式在实现传统产业的技术改造、特别是改善高分子材料的品质和性能或合成新型产品方面显示了强劲的技术活力。自 20 世纪 80 年代以来，辐射加工因世界核反应堆和带电粒子加速器的发展，其加工规模与应用范围日益扩大，在一些工业发达国家形成产业。近十几年来，我国电子束辐射的产业化进程发展较快，年均以 20% 的速度增长。目前投入使用的电子加速器生产线 49 条，电子束功率达 2 830 kW，年加工物品超过 70 亿元产值。

电子束辐射加工涉及的领域十分广阔：某些化工材料的辐射加工（固化、表面改性等）；硅功率器件的电子束辐射；医疗用品和药品的辐射消毒灭菌；食品的辐射保藏；辐射育种和菌种诱变；“三废”的辐射治理以及宝石辐射改色等方面。在辐射加工的推广应用中，辐射工艺学研究起着重要作用，它是保证产品质量、降低加工成本、扩展加工范围的重要环节。利用加速器进行辐射加工，具有很多有利条件：节能、无残毒、易于控制、污染少。在辐射加工中，准确可靠的剂量测量是保证辐射产品质量的关键。近几年来，辐射加工技术在配方、抗氧剂、交联机理、性能检测等方面的研究正向更深、更宽的方向发展，在材料科学、生命科学、生物工程、环境保护、营养学、医疗科学、电子工程、航空航天、地质、石油化工等方面已取得重要成果。因此辐射加工技术正在突破传统的应用格局，向科技前沿和生产广度渗透，形成许多新的应用领域。因此，电子束辐射加工的应用范围还在不断扩大。

7.1　高分子材料电子束辐射加工

电离辐射强烈的化学效应可导致有机分子的聚合、共聚、高分子化合物的交联与降解等。这些特有的辐射化学效应为传统制造行业的工艺改进，以及保证材料品质满足使用要求提供了可能性。

有机高分子聚合物在电子束或 γ 射线的作用下可使大分子之间发生化学键搭桥，形成三维网状结构（辐射交联），从而可显著改善材料的化学稳定性和热稳定性，甚至赋予材料一些新性能。辐射交联技术的开发，为电线电缆绝缘层材料、热收缩材料、橡胶硫化、高分子温控材料、泡沫塑料、工程塑料等辐射新产品的问世奠定了基础，同时也促进了相关产业的技术进步（见表 5.2-7）。

表 5.2-7　有机高分子材料电子束辐射改性产品的应用

反应类型	应用领域
辐射固化	涂层固化、复合材料
辐射聚合	高分子环保材料、聚合复合材料、聚合涂料、高吸水性材料、光学材料、LB 膜、超微粒子
辐射接枝	高分子材料增溶剂、特种功能膜、生物材料、纤维改性
辐射降解	废弃物再利用、天然纤维素的再利用
辐射交联	热收缩制品、电线电缆被覆材料交联、聚乙烯发泡材料、工程塑料改性、PVC 材料及温控电热带

7.1.1　复合材料电子束辐射固化

复合材料电子束辐射固化成形技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种低成本制造技术，电子束固化是通过电子加速器产生的电子束或 X 射线辐射基体树脂，使树脂基体得到高能电子而进行分子交联，最终发生树脂复合材料的快速固化。

复合材料的电子束固化工艺相对于传统的热压罐固化工艺具有许多优点。

1）节约能源　室温或低温固化，基本不需要辅助材料，故能耗较低。

2）环境污染小　涂料一般为无溶剂型，湿膜可 100% 转化为成膜物质，不存在溶剂挥发问题。

3）生产效率高　固化速度快，成形周期短，工艺操作性好。

4）设备占用空间小　常规固化厂房占地面积为电子束辐射固化厂房的数倍以上。

5）降低产品成本　固化后制件热应力低，解决了限制复合材料技术应用的高成本问题。

6）适用性广　可对涂层材料、层压材料、热敏基材进行固化，还适合于复合材料的修补。

电子束辐射固化采用一种扫描型的电子加速器，其基本原理与家庭使用的电视机十分类似。在电视机中经加速的电子流扫描电视荧光屏取得视觉信息，辐射固化中电子加速器产生的电子束对基材表面进行扫描从而实现固化加工。

目前，电子束辐射固化已经相继成功应用于凹版印刷、层压材料、金属涂层、金属化薄膜、压敏粘合剂 PSA 和亮光剂等几十个领域。电子束固化复合材料拥有很重要的军事应用前景，对于新一代军用飞机，结构减重十分重要，它可使复合材料的应用从结构蒙皮、框、肋等结构件向具有高减重效益的大型结构件、承载梁等扩展。大型复合材料结构则将应用于军用防弹装甲的制造。由于多层结构防弹装甲、机库、仓库门窗等大型建筑的防弹以及军用车辆的装甲需要大尺寸、大厚度复合材料结构，常规的复合材料固化技术难以实现此类构件的制造，电子束固化树脂体系将能满足此类复合材料结构的树脂体系和制造工艺的要求。

（1）电子束固化树脂原理

由于电子束固化工艺同热固化工艺有明显不同的固化机理，因此对于固化的树脂具有特殊的要求。

1）自由基引发机理　对于乙烯基树脂，电子束辐射到树脂的双键，双键吸收电子能量，成为能引发聚合反应的游离基。因此，自由基引发的电子束辐射固化不需要引发剂，电子束辐射固化可以对双键化合物进行接枝。

2）阳离子引发机理　阳离子引发反应机理是在引发剂

的作用下产生的。经常采用的阳离子引发剂是碘嗡盐和硫嗡盐。嗡盐在辐射下分解成强质子酸，强质子酸攻击环氧基上富含电子的氧原子，而形成羟基，同时相邻碳原子形成碳阳离子，而碳阳离子继续引发反应。质子酸的酸性越强，则引发单体阳离子聚合的活性越强。由于质子酸是在辐射过程中产生的，所以阳离子固化环氧树脂在没有辐射状态下具有优异的储存稳定性、固化速度快、污染小、固化收缩率低等特点，而且其固化物耐热性好、吸湿率小。

$$>C=CH_2 + e \longrightarrow :CH_2—C<\cdot$$

$$:CH_2—C<\cdot + CH_2=C< \longrightarrow$$

$$:CH_2—\overset{|}{\underset{|}{C}}—CH_2—C<\cdot \longrightarrow etc.$$

(2) 电子束辐射固化设备

电子加速器是电子束固化工艺的主要设备，电子加速器的类型可以按照能量范围、电子束形状、加速器形状等形式分类。一般按照能量范围分类如下。

1) 高能量电子加速器，这种加速器将电子枪产生的电子载波于调速管产生的高频波上，用导波管加速得到高能量的电子束。这种加速器通常是直线型电子加速器，它可以将电子的能量加速到 1.6 pJ。

2) 中能量电子加速器，它们通常以直接高压的发生方式产生电子。电子束从高真空的辐射喇叭通过钛或钛合金箔的窗口辐射到大气中。

3) 低能量电子加速器，采用丝型阴极发生器获得屏式电子束或宽阔的电子束。

在电子束固化工艺中，辐射屏蔽室的防辐射设计是必需的。辐射屏蔽的主要功能是防止射线穿透屏蔽墙伤害工作人员，屏蔽室的设计必须满足国家有关部门对人体辐射剂量的最低要求。屏蔽室的辐射防护主要防止电子束和 X 射线的辐射。电子束本身的穿透能力相对较低，一般的建筑物即可屏蔽，但是由电子束转化成的 X 射线的穿透能力很强，需要专门的防辐射建筑才能满足要求。为了减少对屏蔽室的土建投资，可将屏蔽室建成半地下式或地下式。

在电子束辐射固化过程中，在辐射室内会产生大量对人体有害的臭氧，因此屏蔽室内必须安装专用通风设备，将室内的臭氧排出室外并在一定高度释放。臭氧产生的浓度与空气吸收的电子束功率呈函数关系，吸收越大则产生的臭氧越多。同时这也说明相同电子束穿过的空气层越厚，产生的臭氧越多。因此，为了减少臭氧的产生，应尽可能减小加速器窗口与被辐照物之间的距离。

(3) 电子束辐射固化的基体树脂

可电子束固化的树脂按固化机理可分为两类（见表 5.2-8）。

(4) 电子束辐射固化树脂工艺

复合材料预浸料进行电子束辐射固化的工艺关键是预处理，由于辐射固化过程是在常温、真空或无压力状态下进行的，所以预浸料中的挥发分、铺叠过程中裹入的空气必须在预处理过程中排除。

表 5.2-8　可电子束固化的树脂分类

分类	树脂材料	特点
自由机理固化	丙烯酸酯、甲基丙烯酸酯类	固化后使用温度和断裂韧性较低，收缩率高，固化过程受到氧的阻抑
阳离子机理固化	环氧树脂	固化过程不受氧的阻抑，综合性能较好，但树脂中必须添加少量的光引发剂

以 QY9812 树脂为例，其预处理工艺：115℃ ± 5℃下保温处理 10 ~ 20 min，加压 0.2 ~ 0.5 MPa 后保温 5 ~ 10 min，然后保压降温至 50℃以下。

1) 辐射固化　电子束的穿透深度是电子束固化工艺的基础概念，电子束的穿透深度为电子束的剂量（强度）等于入射表面电子束强度时的深度。通常情况下，电子束在材料中的强度先随厚度的增加而增加，然后随厚度的增加而减少，因为电子在材料中穿透时，一部分电子的能量在被消耗的同时，另一部分电子被反射或散射回去，从而增强了前面部分材料的电子束辐射强度。同时，电子束对同一种材料的穿透深度与电子束的能量成一定的函数关系。因此说，适当的辐射剂量将有利于树脂基体的充分固化，但是过量的辐射剂量将导致树脂基体的辐射降解，从而使复合材料的性能下降。因此，辐射剂量的选取是电子束固化的关键。

进行预处理的复合材料预成形件在真空或无压力状态下进行电子束辐射固化，辐射剂量为 150 ~ 200 KGY。

预浸料铺贴电子束辐射固化：

电子束固化乙烯基环氧树脂的最佳预处理工艺方案：

树脂加热至 115℃，保温处理 15 min，然后加压至 0.6 MPa，并保温 10 min，最后保压降温至 50℃以下。

溶剂选用二氯甲烷，辐射剂量为 200 KGY。

2) 存在问题

① 材料成形问题影响材料的基本性能　解决措施：适当提高电子束辐射固化的辐射计量。

② 空隙率较高　产生原因如下。

a) 预吸胶时压力不够，预浸料在预成形时没有压实，同时板件的厚度没有得以控制，试件过厚，也是降低性能数据的原因所在。

b) 预吸胶时温度较低，预浸料中的挥发成分没有充分挥发，辐射固化时，挥发成分继续逸出产生气孔。

解决措施：

a) 增大预吸胶时的压力；

b) 提高预吸胶时的温度；

c) 选用沸点更低的挥发性有机物作为溶剂。

7.1.2　电子束辐射交联电线电缆

电子束辐射交联是利用高能电子束照射电线和电缆，使其绝缘包层材料的分子借助主要价键连结成网状结构，材料的物理化学结构的变化引起某些性能的改变，可以提高其耐热性、阻燃性、耐腐蚀性及其机械强度等，从而获得高质量的电线电缆产品。目前，经电子束辐射交联的电线电缆已在航天、航空、机电、交通和轻工业等方面得到广泛应用。

例如：北京市辐射中心利用 BF－5 型电子直线加速器，研制成一套辐射交联电线电缆工艺。该中心的辐射交联系统中的绕放线设备，对于直径 2 mm 的电线每小时可绕放 10 km；滚动装置可保证电线在辐照时以一定的速度滚动，并装有远距离监听、监视和停转保护装置，以确保辐照工作正常安全进行。利用铝板吸收法测量了 BF－5 电子直线加速器的负载特性曲线。采用测量深部吸收电子流的方法测量其



相对吸收剂量值，并用已刻度好的薄膜剂量计测量吸收剂量值，从而得出其入口剂量等于出口剂量时的厚度，以确定电线被辐照的厚度和应辐照的时间，实验值与理论计算值在误差范围内取得了很好的一致。为了确保辐照电线电缆的质量，测定了辐照后聚合物的凝胶率和吸收剂量的关系，并通过测定不同位置线缆的凝胶率，来研究束下滚筒布线的横向均匀性与深部均匀性，包括分别测定电线正反面的凝胶率，进一步研究深部均匀性。结果表明，用这套束下滚筒装置控制束流和辐照时间，可使电线电缆得到适合剂量的均匀辐照。利用这套辐射交联电线电缆工艺批量生产了约三千多公里的阻燃电视高压线，质量达到了日本三洋电器公司的同期同类产品（ITEM UL3239 No B－1 7，No C－14－26，No C－20－26）以及日本住友电器工业株式会社的同期同类产品（ITEM UL3239 No F－29，No F－30，ESI－3046）的水平，取得了比较好的经济效益和社会效益。

7.2 医疗用品及食品的电子束辐射灭菌消毒

7.2.1 辐照卫生安全

随着人们对辐照消毒灭菌优越性认识的不断提高，辐照加工取代化学加工已是全球性的趋势，前景十分光明。近年来，尤其是西方发达国家，如美国受食源性疾病的困扰，使消费者对食品辐照作用的认识越来越深刻。食品的安全性和植物检疫的卫生措施是当今世界必须解决的问题。我国已经加入世贸组织，食品辐照是 WTO 认可的一项技术。因此，发展辐射加工，对促进我国与北美及欧盟各国的出口贸易，减少贸易风险有重要的现实意义。

中国于 1997 年 6 月正式颁布了六大类七大项辐照食品的国家标准。即：

《辐照熟畜禽肉类卫生标准》GB 14891.1—1997

《辐照干果、果脯类卫生标准》GB 14891.3—1997

《辐照香辛料类卫生标准》GB 14891.4—1997

《辐照新鲜水果、蔬菜类卫生标准》GB 14891.5—1997

《辐照冷冻包装畜禽肉类卫生标准》GB 14891.7—1997

《辐照豆类、谷类及其制品卫生标准》GB 14891.8—1997

辐照卫生标准的制订，将使食品辐照走上健康发展的道路，它对保护人们身体健康和环境不受污染，对提高产品的质量和市场竞争力有重大意义。

7.2.2 电子束辐射消毒装置

各种加速器的不同主要在于电子束的加速方式和所需高压的产生方法。本节中所列出的电子加速器的能量均小于或等于 10 MeV，这是因为此能量范围内的辐射设备的任何部分都没有感生放射性。在此前提下，将电子束辐射装置分为两大类。

Ⅰ类　一种带有联锁的整体屏蔽装置，由于屏蔽的构型，运行期间人员实际上不可能接近（图 5.2-79）。

Ⅱ类　一种用于屏蔽室的装置，运行期间借助于入口控制系统，保持人员无法接近（图 5.2-80）。

7.2.3 医疗用品及药品的电子束辐射灭菌消毒

辐射方法是近年来兴起的一种新型灭菌消毒工艺，目前在世界经济发达国家已突破技术、经济与心理障碍取得成功而形成产业。据预测，这种消毒灭菌方法将逐步取代常规的化学消毒方法。原因在于已发现化学法所采用的消毒剂环氧乙烷具有强的致癌效应，而去除医疗用品中这种化学残留物则将大大增加成本，从而丧失市场的竞争能力。医疗用品电子束辐射灭菌消毒的工作原理是利用电子加速器产生的高能电子与 X 射线的化学生物效应，以达到杀灭病原微生物的目的。

目前辐射灭菌消毒的医疗用品种类繁多，包括金属制品、塑料制品以及一次性使用的高分子材料医疗用品等共计上千种，如一次性使用皮下注射器、一次性使用注射针头、各种医疗用内、外科手术刀、骨挫、钻头、骨水泥、子宫避孕环、产科用具、输精管切除用具、黑塞尔式脐带夹、各种采血输血与输液用具、天然或合成手术缝合线、胶布、纱布、绷带、医用脱脂棉、卫生纸、罩衣、帽子、妇女卫生用品、儿童保健用品等。另外，某些生物组织与生物制剂，如心脏瓣膜、血管、神经末梢、角膜、骨骼、硬脑膜、腱、皮肤与血液衍生物，以及中西成药与化妆品也都可采用辐射消毒灭菌。所谓“一次性使用”这一术语是第二次世界大战后建立起来的一种新概念，即消毒灭菌医疗用品使用一次就予以丢弃，这样可大大减少人群中交叉感染的机会，从而降低发病率。

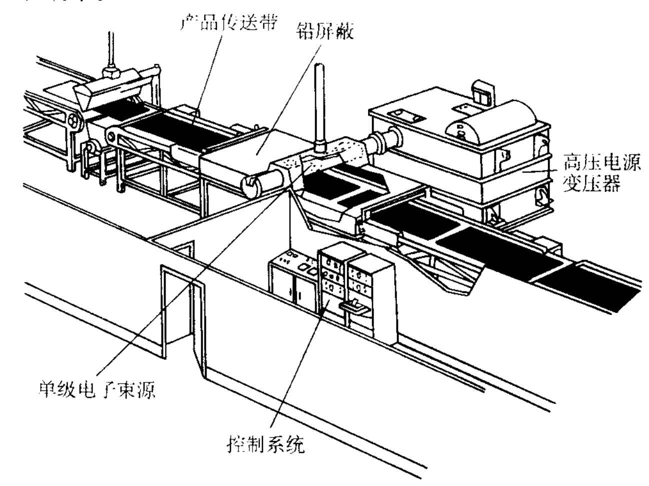


图 5.2-79　第Ⅰ类电子束辐射装置：配有联锁装置的整体屏蔽装置

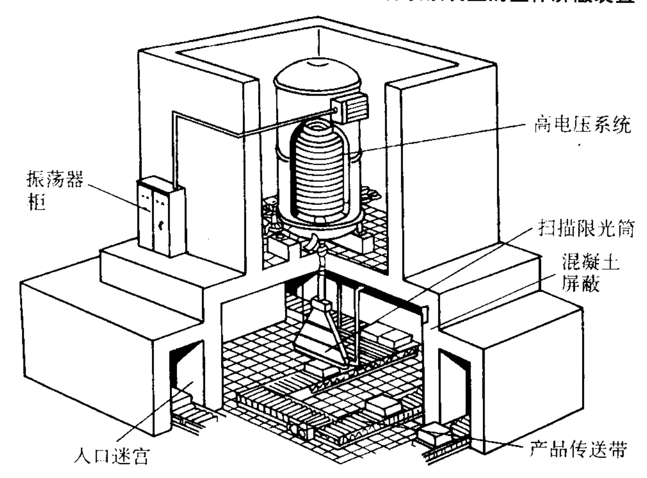


图 5.2-80　第Ⅱ类电子束辐射装置：安装在屏蔽室内的加速器，并且在辐照过程中保持人员不能进入室内

医疗用品消毒灭菌较之常规的加热过程与化学过程有如下特点：

1）冷消毒；
2）消毒灭菌彻底；
3）无污染；
4）工艺简便快速；
5）节约能源，处理费用较低。

医疗用品辐射消毒灭菌一般都为大规模连续生产，故一次性投资较大，不适合小批量医疗用品的消毒灭菌，也难以用在多次使用的医疗用品消毒上（见表 5.2-9）。

7.2.4 食品及其包装制品的辐射保藏

食品类物品的辐射保藏是利用某种电离辐射源（γ 射线、X 射线或电子束射线）发出的射线对食品进行照射，从

而引起食品中一系列化学或生物化学反应，达到抑止发芽、推迟后熟、延长货架期、杀虫、灭菌的效果。这种保藏方法与常规的热处理、化学处理、脱水处理、冷冻处理等一样也是一种食品加工方法，通常把这种经辐照处理的食品称为辐照食品（见表 5.2-10）。

表 5.2-9　医疗产品辐照消毒的应用

辐照目的	辐照产品
消毒灭菌	1）一次性用品：如输液器、输液针、注射器、注射针、输血器、输血针、药液过滤器、缝合线、纱布材料、药棉、导液管、血浆、灌输物质和组织体素等 2）器具类：如手术用器具、乳胶手套、口罩、化验器具、妇产科用的设备、移植用器具、托架和容器等 3）病历和废弃物等

表 5.2-10　食品辐射保藏分类

辐照目的	辐照产品
消毒灭菌	1）畜禽肉类及其制品：如熟猪、牛、羊、鸡、鸭、兔肉类及肉类制品、肉类罐头制品 2）冷冻包装畜禽肉类 3）水产品类：鱼、虾蟹、贝类及其制品 4）方便主食、糕点类、乳制品、饮料、酒类、酵母、酶制剂 5）药品类：中成药、西药片剂、生化制品、生药原粉、各种功能口服液
杀虫、防霉、保鲜	1）豆类、谷类等粮食及其制品、饲料、鱼粉等 2）干果果脯类：花生、板栗、红枣、桂圆、空心莲、核桃、杏仁、山楂，以及由此制作的脯类和蜜饯食品 3）香辛料等调味品类：如八角、花椒、五香粉、味精、食醋、酱油
抑制发芽	新鲜根式蔬菜：如大蒜、洋葱、土豆、生姜
储存保鲜与推迟后熟	1）延长新鲜水果、蔬菜保鲜期：如苹果、柑橘、荔枝、龙眼、芒果、草莓、猕猴桃、茭白、花菜 2）推迟后熟：如番茄、蘑菇、刀豆、冬笋等

辐照食品技术开发面临的一个最重要的问题就是食品的卫生安全性问题，即食品经辐照处理后在营养质量、微生物学和毒理学方面是否有利于人体健康，并符合卫生要求。目前，任何食品辐照的总体平均剂量直到 10 kJ/kg，都没有毒理学危害，也不会引起特殊的营养学或微生物学问题。因而这样辐照的食品不必再进行毒理学试验。这一结论为辐照食品的实用化与民营商业化铺平了道路。

例如：1988 年法国科学家曾报告电子束辐射对软木塞的灭菌效果，他们观察到在 25 KGy 的剂量下，软木塞的机械与感官特征都没有改变。葡萄酒行业对消毒软木塞不断增长的需求提出了进一步研究的需要。研究对软木塞的以下特征进行了调查：

1）微生物控制（剂量从 1～25 KGy）；

2）湿度和弹力（剂量分别为 25、100、1 000 KGy）；

3）各种可提取化合物（剂量分别为 25、100、1 000 KGy）。

各种酚酸、各种醛和挥发性酚类化合物利用乙醇溶液从软木中提取出来，然后进行 HPLC 或 GC 分析。挥发性物质通过顶部动力技术进行分离，并利用 GC/MS 进行分析。未处理的软木塞和经不同剂量处理的软木塞经 LSD 测验比较差异的显著性。

结果表明，电子束辐射剂量在 25 KGy 条件下对软木塞质量的各种参数均不产生不良影响，因此这是一种适宜生产优质软木塞的处理方法。

7.3　硅功率器件的电子束辐射改性

电子束辐射加工的进展使一些成熟的工艺正成为高技术产业化的开发内容。除上述典型应用以外，电子束辐射还可应用于功率半导体器件的生产，以代替传统的金（铂）扩散工艺，改善电力半导体器件的关断时间特性。

电子束辐射硅功率器件是 20 世纪 70 年代初发展起来的新工艺，它利用加速器产生的高能电子束辐射硅功率器件，该工艺通过精确控制电子束辐射条件，使硅材料晶格中的点阵原子发生位移，造成晶格空位和间隙原子。这些空位和间隙原子要和硅中的其他杂质、空位相互作用，形成在深能级复合中心（复杂的晶格缺陷）组成缺陷络合物，如氧空位对、磷空位对、双空位对等以控制少数载流子（又称少子）的寿命，从而控制器件的关断时间。该技术具有以下特点。

克服了传统缩短少子寿命金（铂）扩散工艺存在漏电流大，高温阻断特性差、少子寿命难于精确控制和成品率低的缺点。

工艺成本低廉，过程简便、重复性好，产品均一，可大量加工。

效果良好、成品率高和经济效益显著。

此项新工艺越来越广泛地得以推广应用，已成为我国功率半导体器件制造工艺中重要组成部分。

8　电子束曝光

随着生产和科学技术的不断进步，电子束加工技术有了更大的发展并得到了广泛的应用。近几年来，电子束曝光技术已广泛应用于集成电路、微电子器件、集成光学器件等精密机械零件的制造中。

8.1　基本原理

8.1.1　平面制作技术

集成电路、微电子器件、集成光学器件以及表面声波器件等元器件的图形制作技术，一般称作平面制作技术。它是固态工艺中一项重要的工艺。其基本原理如图 5.2-81 所示。

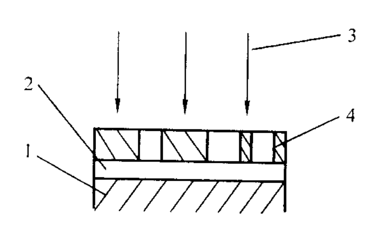


图 5.2-81　平面制作技术中的曝光原理

1—工件；2—曝光胶；3—辐射线；4—掩模

作为衬底材料可以是硅片、石英、陶瓷和玻璃等。衬底表面用辐射敏感聚合物进行涂覆，并根据所需图形对其曝光。所需图形由掩模板提供，也可采用扫描电子束曝光，由电子计算机控制。辐射敏感聚合物衬底材料根据所用曝光辐射的不同而异。如紫外线曝光时是用光刻胶；电子束曝光时则用电致抗蚀剂。

8.1.2　电子束曝光技术

电子束曝光通常是微细加工技术中的前道工序，也是决定加工精度的关键工序之一。电子束波长很短，一般小于 0.1 nm，在亚微米范围内的衍射效应可以忽略不计，并且电子束流容易控制，因而电子束曝光成为亚微米图形曝光的有利工具。



衬底上涂覆一层厚度均匀的辐射敏感聚合物薄膜，在特定区域内用电子进行轰击，使聚合物薄膜产生化学反应而形成图形的方法，称为电子束曝光。这种辐射敏感聚合物称为电致抗蚀剂。

同光刻胶一样，电致抗蚀剂也分为正性电致抗蚀剂（相当于正胶）和负性电致抗蚀剂（相当于负胶）。正性电致抗蚀剂在电子的轰击下，聚合物链的断链作用超过交联作用，因而"曝光"部分可以用显影剂去除。负性电致抗蚀剂在电子轰击下，聚合物主要产生交联作用，因而未"曝光"部分在显影剂的作用下被去除。常用的正性电致抗蚀剂是PMMA胶。由于这种PMMA胶具有高分辨率和高对比度，虽然曝光时间较长，但在电子束曝光中还是被广泛使用。常用的负性电致抗蚀剂是环氧化聚丁和聚缩水甘油丙烯酸甲酯。

电子束曝光时，电子束对材料的作用是电子束的化学效应，也可以这样理解，即电子束曝光是把电能转化成化学能。

电子束曝光时，是采用能量密度较低的电子束，仅仅对工件表面的辐射敏感聚合物其断链和交联的作用，而不使其热分解，也不使其软化，更不允许产生熔化现象。

电子束曝光主要分为两类：扫描电子束曝光，又称电子束曝光；投影电子束曝光，又称电子束面曝光。当前，国内外研究人员都致力于发展扫描电子束曝光，尤其着重发展可变成形束的扫描电子束曝光。

8.2 扫描电子束曝光

8.2.1 扫描电子束曝光机的束斑

早期的扫描电子束曝光机与一般电子束加工机一样，采用原形束斑。但从70年代起，人们试图通过束斑形状的改变来提高生产率。首先研制出的是矩形束（或方形束）。接着受到投影电子束曝光机原理的启发而研制出可变成形束扫描电子束曝光机。图5.2-82是各种束斑形状的扫描电子束曝光机的束斑成像原理。

（1）圆形束

图5.2-82a是圆形束成像原理简图。它由电子枪、三级透镜系统和两个图形光阑组成。圆形电子束源是电子枪的交叉斑点，也就是用电子枪的最小截面圆作为源。两个圆形光阑的作用是减小束流入射透镜的孔径角，以减小球差。三级透镜系统的前两级均为缩小透镜，整个系统在改变束流大小时，不会改变到靶平面的聚焦。

美国贝尔研究所的EBES－II型扫描电子束曝光机就是这类圆形束曝光机。它采用光栅扫描，图形精度可达0.5 μm。一块 ϕ76 mm的圆片曝光时间为40 min。

（2）方形束

图5.2-82b是方形束成像原理图。电子枪发出的电子束通过透镜照射到光阑1。光阑1的孔是方形孔因而束柱通过光阑1后，就形成肪方形束柱（截面为方形）。光阑1的作用，首先是作为方形束柱的源（而圆形束曝光机以电子束枪的交叉斑点作源）；其次是减少孔径角以减少球差。这个成像系统与圆形束曝光机基本组成相似，也是由电子枪、三级透镜系统和两个光阑组成。除光阑1的作用与圆形束略有差别外，其他都类似。

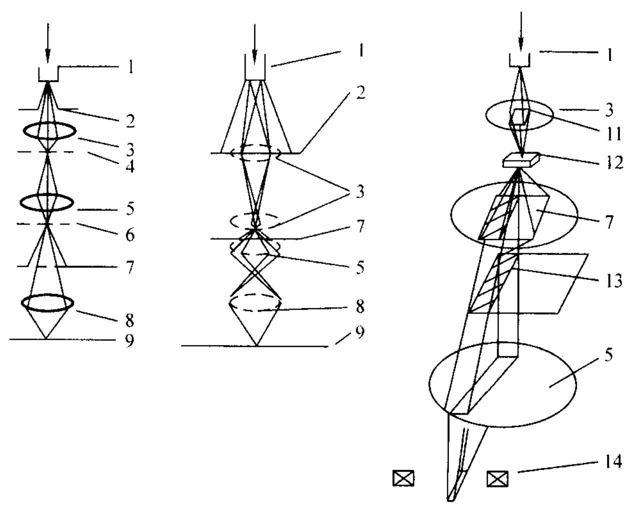


图5.2-82 扫描电子束曝光机的束斑成像原理

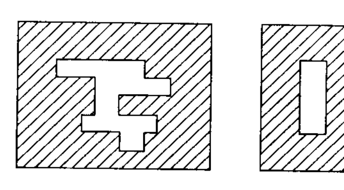
1—电子枪；2—光阑1；3—透镜1；4—像平面A；5—透镜；6—像平面B；7—光阑2；8—末级透镜；9—工件；10—缩小透镜1；11—方形束流；12—偏转器1；13—矩形束流；14—偏转器2

（3）可变成形束

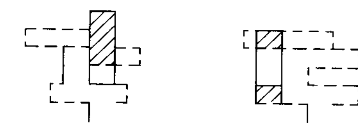
图5.2-82c是可变成形束成像原理图。在可变成形束的成像系统中，光阑1和光阑2都是方形孔。光阑1的作用与方形束成像系统中的光阑1一样，使通过此光阑后的电子束成为方形束柱，并用此光阑作源。与方形束成像系统的差别是，两个光阑中间以及光阑2下面分别加上一套偏转系统。偏转器1的作用就是把形成的方形束偏转投影到光阑2。调节偏转器1就可以调节投影到光阑2的束柱的位置，使通过光阑2以后的电子束柱或者成为方形或者成为矩形。这些几何图形的尺寸也是可变的，这样就可以使图形和尺寸与器件电路的单元图形一致。通过光阑2后的可变成形束柱，经透镜2和偏转器2后，可投影到器件电路所要求的位置。

日本于1977年研制成功的JBX－6 A可变成形束扫描电子束曝光机的成像原理，与图5.2-82c相似。它的光阑1的方形孔边长为125 μm。通过光阑1以后的束柱经透镜1整型，并经偏转器1使束柱在光阑2平面的 X、Y 方向上偏转，这样可以改变束柱的形状和尺寸。光阑2下面的缩小透镜将变形束的像缩小至1/5。偏转器2以矢量扫描方式在工件上绘制图形。JBX－6 A可变成形束的束斑尺寸为1～25 μm，并能以0.1 μm的节距在 X、Y 方向上改变。该机降低肋束流密度，以防止束流边缘分辨率下降，因而曝光速度低于理论分析值。但JBX－6 A仍比圆形束的JBX－5 A曝光机的曝光速度要高几倍，能在直径100 mm的硅圆片上以25 min曝光一片的效率进行工作。

美国IBM公司的VSS型可变成形束扫描电子束曝光机与JBX－6A相仿。但VSS机的第二个光阑的孔形除正方形外还有人字形和L形的。该机在工件上的束斑尺寸，矩形时边长在0.6～2 μm范围内可调，最小节距为0.2 μm。



(a) 光阑孔形

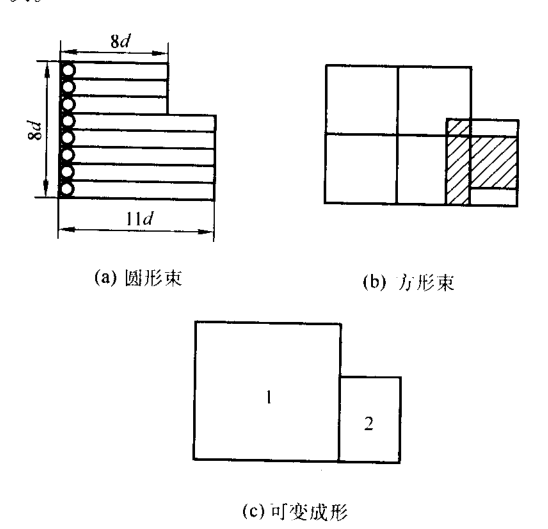


(b) 光阑的组合图形示例

图5.2-83 美国贝尔研究所曝光机的光阑

图 5.2-83 是美国贝尔研究所设计的可变成形束扫描电子束曝光机的光阑孔形图。其中图 5.2-83a 的两个光阑孔形，在设计上是比较特殊的。第一个光阑孔是由 13 个正方形单元组成的凹凸多边形；第二个光阑孔是由 4 个正方形单元组成的竖条矩形。每个正方形单元的边长为 100 μm，投影到工件上的每个正方形单元的边长为 0.5 μm。将两个光阑的投影加以组合后，束柱可以成为矩形、正方形、L 形以及其他各种形状。图 5.2-83b 的斜线部分分为两光阑投影组合后在工件上所得的图形，这两个光阑可重叠组合出 16 个通用图形。该机改变尺寸所需的时间为 5 ns；曝光一个矩形图案时间为 50 ns，比方形束的曝光速度提高 2 倍以上。

现将圆形束、方形束和可变成形束的曝光速率作一粗略比较。以图 5.2-84 为例。图中假定：各种束的曝光面积相同；束流密度相同。圆形束的直径为 d，则在此图形上扫描一行要投影 8 次（当线长为 8 d 时）和 11 次（当线长为 11 d 时）。圆形束对全图进行扫描，应投影 $3\times8+5\times11=79$ 次。而方形束曝光该图形总投影次数为 6 次；可变成形束只需 2 次。



(a) 圆形束　　(b) 方形束

(c) 可变成形

图 5.2-84　各种束的曝光速度比较

从上述粗略分析看，方形束比圆形束的曝光速率似乎快 10 倍以上，但实际上并达不到。上述分析是假定束斑的电流密度相同，但这并不符合实际情况。从目前的电子光学系统来看，方形束的电流密度小于圆形束。当方形束的束斑面积增大，而使用较大电子束流密度时，就会导致空间电荷效应影响的增加，因而成像的像差随之增加。当电子光学系统满足不了像差设计要求时，只能把束流电流密度降低。实际计入电子束束流密度的影响以后，方形束一般只比圆形束的曝光速率提高几倍。

8.2.2　扫描电子束曝光机的扫描方式

在扫描电子束曝光机中，为了确保束流的扫描线性和束流的稳定性，单元扫描面积都比较小，一般为 5 mm² 左右。此面积远小于工件（硅片或掩模板）的曝光面积。为实现工件全面曝光，必须移动工作台配合电子束扫描。工作台的移动方式有连续运动和分布重复运动。后者进行曝光时，工作台静止；工作台分步重复运动时，则不进行曝光。扫描电子束曝光机的扫描形式基本上可以分为一维线扫描和二维线扫描。

8.2.3　扫描电子束曝光机

扫描电子束曝光机的基本组成见图 5.2-85。它是由电子枪、电子光学系统、电子束扫描系统、真空系统、电源和电器控制系统、精密工作台分布重复系统、电子检测标记自动重合系统和电子计算机系统组成。

电子枪发射的电子束，通过磁透镜系统聚焦于工件表面，在工件表面形成束斑直径为 0.01～1 μm 的细电子束。计算机按照曝光图形通过 D/A 转换器、偏转放大器和偏转线圈组成的扫描系统，控制电子束的束斑在工件表面上扫描，绘制精细图形；用步进干涉仪进行位移的在线测量，以确保工作台的位移值在规定误差之内。检测系统用来对工件定位和保证套刻精度。电子束曝光的基本图形可以是矩形、多边形或圆形，由计算机的专门指令程序加以操作和控制。电子束的通断是由束闸控制。

由于扫描电子束曝光机属于细束流，束斑直径小于或接近微米级，所以在扫描电子束曝光机中，为了提高电子束的亮度，有采用高亮度的硼化镧（LaB_6）阴极或场致发射阴极取代过去常用的钨丝阴极的趋势。但这两种阴极的价格昂贵，要求在高真空下使用，在实际操作、使用和维护上都比较复杂。

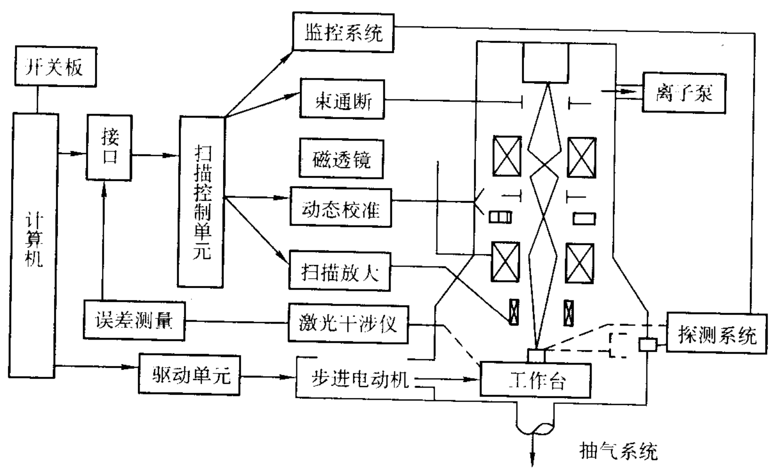


图 5.2-85　扫描电子束曝光机的基本组成

表 5.2-11 是几种阴极的性能比较。

在使用扫描电子束曝光机制作工件时，由于工件图形的线条细，又需重复套刻次数，因而工件定位精度要求很高。工件定位准确与否是关系到成品率的重要问题。一般在扫描电子束曝光机中工作台作分布重复运动时，必须对工作台的位移进行测量、定位。无论是人工或自动更换工件（例如掩模板或硅片），需要对更换后的工件位置是否准确，是否与 X、Y 坐标平行进行检测。制作器件时，要对图形进行数次套刻，因而必须保证每个芯片内单元图形彼此之间的重复套刻精度。对于上述的一种情况可用激光干涉仪定位，后两种



情况可用电子检测标记定位。

表 5.2-11　阴极种类和性能

性能＼种类	热钨丝阴极电子枪	硼化镧阴极电子枪	场致发射阴极电子枪
电流密度 $J/A\cdot cm^{-2}$	2	≥5	1 000
亮度 $\beta/A\cdot(cm^2\cdot rad)^{-1}$	10^5	10^6	$10^8\sim10^{10}$
交叉斑点直径 d_o/mm	$(20\sim50)\times10^3$	10^3	10
寿命 t/h	50	500	≥1 000
真空度/Pa	10^{-2}	$10^{-3}\sim10^{-5}$	$\geq5\times10^{-7}$

8.2.4　扫描电子束曝光机的应用

美国商用机器公司采用电子束对硅片直接曝光，制造出256 K的MOS随机存储器，其最小线宽为0.1 μm。美国仙童公司是用电子束曝光机生产9940型16位微处理器机的掩模板。美国德克萨斯仪器公司用电子束直接曝光，已成功地研制出宽度为0.4 μm，基频率高达3 000 MHz的声表面波器件。这比采用常规工艺制造的声表面波器件的中心频率高4倍。更重要的是采用新工艺后，从设计到封装的时间，由原来的56天缩短到3天。该器件已成功应用于军用的细光栅扫描接收机中。日本三菱公司已利用电子束直接曝光制造高频场效应管。源极与漏极之间的距离已达4.5 μm；栅极的线条也已达0.3 μm。

在集成光学上已成功地将电子束曝光制出的掩模板，再用阴影曝光法（接触式）曝光后，在玻璃衬底上刻出周期为800 nm，线宽为400 nm的光栅。

由于扫描电子束曝光机曝光的线条宽度可达0.1～0.008 μm，所以对微电子器件的发展起到了很大的推动作用。

8.3　投影电子束曝光

虽然扫描电子束曝光技术的曝光线条已达亚微米的分辨率，但仍存在曝光时间长、生产率低、机器复杂和成本高等缺点。

投影电子束曝光可以在大面积上获得亚微米的高分辨率图形。它的优点是生产率高、成品率高。但投影电子束曝光也有缺点，即本身不能像扫描电子束曝光那样制作掩模原板，所以最好是将扫描电子束曝光这两种技术结合起来。即用前者制作掩模板，而用后者复制掩模板和制造器件。

目前投影电子束曝光机，已能在直径30 mm的硅片上，大面积均匀地获得1～2 μm的分辨率，最高分辨率已达0.75 μm，曝光时间只需1 min左右。投影电子束曝光近年来得不到进一步发展的原因主要是投影电子束曝光机的对准技术始终未能解决，因而套刻精度低，妨碍了进一步提高曝光图形分辨率。因此，国外大都致力于发展扫描电子束曝光机而不太重视投影电子束曝光机。

投影电子束曝光机的原理图见图5.2-86。这是一种1:1的投影电子束曝光机。它有一个成像筒，并且成像筒置于真空室内。真空室的真空度为10^{-3} Pa。在成像筒内有一对平行放置的电极——阳极和光电阴极。两极距离为10 mm，它们3之间有10 kV高压。阳极装上工件（如硅片）或复制的掩模。

光电阴极是在二氧化钛掩模表面镀上一层钯制成的。这种掩模板是对工件（阳极）进行加工而预制的精密掩模原板（一般由扫描电子束曝光制作）。成像筒的最上面是紫外线光源，二氧化钛用作紫外线的吸收体。当阴极受到紫外线照射时，掩模原板上有图形的部分因为无二氧化钛，紫外线会透过这一部分照到金属钯上，使其发出电子；而掩模上无图形部分有二氧化钛吸收紫外线，所以不发出电子。这样，从钯阴极上发生的电子图形就与掩模图形精确一致。这些自钯发出的电子（能量为0.1～0.2 eV）在均匀电场加速下，投射到工件表面，使工件表面的电致抗蚀产生1:1的电子束图像。电子束投影成像曝光的基本原理是点对点成像。

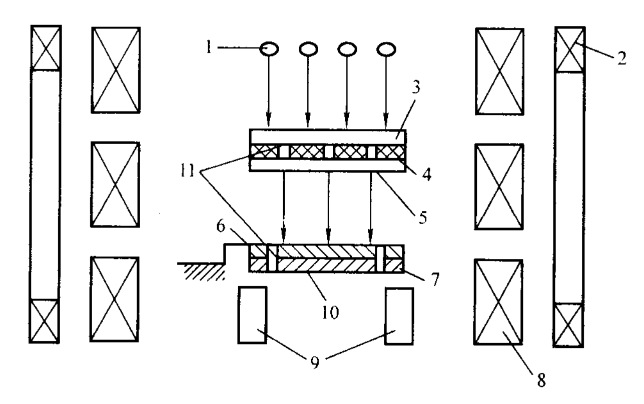


图 5.2-86　投影电子束曝光机原理

1—紫外光源；2—偏转线圈；3—石英玻璃；4—TiO_2掩模；5—Pd层；6—曝光胶；7—硅片；8—聚焦线圈；9—束流检测系统；10—阳极；11—标记孔

聚焦线圈置于成像筒外，由三个同轴的线圈组成。它们分别由三台稳流电源供给电流，产生一个均匀的轴向磁场。钯阴极发射的电子在均匀磁场中沿磁力线作螺旋轨迹运动，保证点对点聚焦于阳极（工件）表面。在聚焦线圈外还有两个相互垂直的磁偏转线圈，产生径向磁场，实现电子图像的偏转位移。

从图5.2-86可以看出，电子束投影曝光机中采用的自动定位对准系统是在工件（硅片）上打两个小圆孔。圆孔下面置一个法拉第筒，用来测量电子束流值。与工件上小圆孔相对应，在光电阴极的掩模原板上也有两个位置相同的圆孔，即基准标记图形。它的尺寸略小于工件上的圆孔直径。由计算机进行控制，使光电阴极上的两个基准标记图形所发出的电子图形对准工件上的相应圆孔。这时束流检测系统（法拉第筒）测得的电子束流值为最大。至此就算完成了每次曝光的定位对准。

当前投影电子束曝光机还未能达到工业实用化。我国用投影电子束曝光机制成的高频器件的最细线条为2.5 μm，间隔为2.5 μm；表面声波器件的最细线条为2 μm，间隔为2 μm。国外已做出最小线条为1 μm的器件，即石榴石上的8 K位移寄存器。

除1:1投影电子束曝光机以外，还有1:10和1:100投影电子束曝光机。例如1:10投影电子束曝光机可以在3 mm×3 mm的单元上曝光，最细线条为0.5 μm，对准精度为±0.1 μm。由于这种机器的掩模原板是镂空的掩模，所以制作困难，另外在电子光学设计等方面也很困难，国外也在研究阶段。

8.4　电子束曝光工艺特点

对电子束曝光必须选择最佳的曝光条件。除正确选择曝光介质外，还应该根据图形分布及其特性尺寸确定曝光参数，如加速电压、束斑尺寸、束流密度、掩模状况、扫描频率等。需要先用各种束流书写出标准测试图形，必要时划出最佳剖面轮廓。如改变一参数，仍需要先书写标准测试图，然后再正式曝光书写图形。电子束的加速电压通常固定不变，抗蚀剂灵敏度s、束流I、扫描频率f及扫描步距L之间的关系为：$f=I/(s\cdot L^2)$。

8.5 电子束曝光技术的最新进展

电子束缩小投影成像曝光技术（简称EPL）是近年来发展起来的超微细加工技术，主要应用于微电子产业等领域。电子束缩小投影成像曝光技术是重要的下一代光刻技术，它有可能成为21世纪主要的生产用纳米级光刻手段之一，目前只有美国和日本两个工业发达国家开始研究。

此外，在DVD母盘制作方面日本索尼公司公布了不需要大型真空室（Chamber）的电子束曝光技术，该项技术是利用DPH（Differential Pumping Head）结构，通过在绘制部位附近形成真空状态来实现的。具体而言，就是在电子束照射部件的周围设置一圈抽气口，然后把它紧贴在作为绘制对象的硅底板上。在这种状态下再猛烈地向外抽出内部的空气，直到将照射部位附近的压力降至10^{-3} Pa为止。离照射部位稍远一点的位置为1Pa，而边缘部位则为10^2 Pa，向外逐渐地使气压接近大气压。在最外部设置一个氮气喷孔以便保持压力平衡，并与硅底板保持5 μm左右的距离。据称通过采用该技术，就能够将更换硅底板所需的时间缩短至2 min左右。而且，通过将电子束的加速电压控制在15 kV，不仅提高了保持层的感光度，同时还可提高线速度。以2.68 m/s的线速度来制作一枚Blu-ray规格的25GB光盘母盘时，播放信号的抖动（不稳定性）降低到了5.9%。据索尼介绍甚至能够以5 m/s的线速度来制作母盘。而且，分别进行了容量为50 GB、70 GB和100 GB的母盘制作，验证了该技术的可行性。

电子束直写在SOC的开发中更具灵活性，电子束（EB）具有波长短、分辨率高、焦深长、易于控制和修改灵活的特点，广泛应用于光学和非光学曝光的掩模制造。电子束直写能在圆片上直接作图，但其生产率很低，限制了使用，在下一代曝光（NGL）中，能否使EB的高分辨与高效率寻得统一，是EB开发商追求的目标。美国硅谷的离子诊断（ion diagnostic）公司开发了微型电子束矩阵，可同时平行直写，称电子束曝光系统（MELS），它设计了201个电子光学柱，每柱32电子束，用于300 mm片子的曝光。电子束的产生采用微细加工方法制造的场致发射冷阴极，每束供15 nA，每柱供480 nA。用三腔集成制造系统，生产率可达90片/时，MELS的目标是70 nm高效曝光，并争取延伸到35 nm。21世纪集成电路（IC）向系统集成（IS）方向发展，在系统集成芯片（SOC）的开发中，电子束直写（EBDW）比其他方法更具灵活性，它可直接接受图形数据成像，毋需复杂的掩模制作，因此前景十分诱人。日本东芝、Canon和Nikon已联手进行研究高效的EBDW，美国IBM曾在这方面做过探索，也准备加入其中。

21世纪，电子束曝光技术的最新发展技术主要围绕纳米电子束曝光技术开展，该技术的发展必将推动微电子等领域的更快发展。

编写：李晋炜（北京航空制造工程研究所）
刘方军（北京航空制造工程研究所）
左从进（北京航空制造工程研究所）
姚振中（北京航空制造工程研究所）
胡　刚（北京航空制造工程研究所）



第3章 等离子体及离子束加工技术

1 等离子体基本概念

等离子体是由大量正负带电粒子和中性粒子组成的并表现出集体行为的一种准中性气体。普通电离气体不全是等离子体，含有等量正负带电子粒子数的气体也不一定是等离子体。等离子体是在一定空间尺度及时间范围内存在的一个完整的整体。

"Plasma"一词是 Langmuir 于 1927 年在研究气体放电现象时提出的，是指含有相等数量的电子和正离子，整体上处于电中性的放电区域；在我国早期译为"等离子区"，以后逐渐将这类气体称为"等离子体"。我国台湾省的科学家将此名词译为"电浆"，是根据"Plasma"原有"血浆"一义而译出的。

等离子体是由大量带电粒子组成的有宏观空间尺度和时间尺度的体系。它和气体、液体、固体组成了物质同一层次上的四个基本形态。在地球环境中，自然界等离子体只存在于远离地球表面的电离层及其以上空间、或者寿命很短的闪电中，因而人类对它们的认识开始得很晚，至今不过一百多年。但在整个宇宙中，目前我们已知道物质间大部分（如各种星体及星体间的物质）都是以等离子体的形式存在的。地球上只有电离层是自然存在的气态等离子体。日常生活中用的荧光灯和霓虹灯内的放电气体是人工产生的等离子体，这类等离子体属于不等温的低温等离子体。

等离子体与固体、液体、气体在组成上最明显的不同之处是后者都是由中性的分子或原子组成的，而前者则由（原子、分子电离后的）电子和离子组成，这些带电粒子可以在空间相当自由地运动和相互作用，有时电子和离子可以相互碰撞而复合成中性粒子，同时中性粒子也会因碰撞或其他原因而电离成离子和电子。因此可以在宏观尺度的时间和空间范围存在着数量大体不变的大量电子和各种离子。正因为如此，等离子体的许多性质才明显地和固体、液体、气体不同，有着自己特有的行为和运动规律。等离子体除了气态等离子体外，还有固态和液态等离子体、半导体中的自由电子和空穴形成固态等离子体，而电解液相当于液态等离子体。

等离子体有高温与低温之分，高温等离子体是指受控热核反应等过程中达到上百万 K（开）或更高温度的等离子体。低温（或低能量）等离子体是指气体中重离子温度在数万 K 以下的电离气体，又分为接近平衡态的热等离子体（电子温度与重离子温度相近）和处于非平衡态的冷等离子体（重离子温度接近室温而电子温度可达几万以至几十万 K)。材料加工主要涉及低温等离子体。它是通过某种机制将固体或气体的原子或分子脱离形成电离气体状态［气体中一般存在六种基本粒子：光子、电子、基态原子（或分子）、激发态原子（或分子）、以及正离子和负离子］，形成等离子体。

1.1 等离子体基本特性、频率、离子间的相互作用

等离子体的集体行为体现在带电粒子的作用不局限于其自身周围。它的运动引起空间电荷局域性集中，产生空间电荷场，同时电荷运动也会引起磁场，这种电荷场及磁场对远处的带电粒子的运动有约束作用。如图 5.3-1，考虑相距 r 的两个空间体积 A 和 B，假设由于某种原因它们稍稍偏离了电中性，即稍许带有某种符号的纯电荷。这两个体积之间存在两个影响其作用的因素，一个是静电库仑力，该力与 $1/r^2$ 成正比，距离 r 越大静电库仑力越小。另一个因素是在给定立体角（即 $\Delta r/r$ = 常数）的情况下，B 体积中偏离电中性的纯电荷量，随 r^3 增加。如果假定 B 体积中纯电荷密度为 q_B，那么随 r 的增加，B 体积的扩大，使 B 体积中含有的电荷总量 $Q_B = q_B Cr^3$，其中 $C = \Delta r/r$ 是常数。若 A 体积中的纯电荷为 q_A，那么两个体积之间的长程库仑力 $F \propto q_A q_B C r^3/r^2$，即 F 随 r 增大而增大。这说明等离子体中的带电粒子运动不仅取决于其周围的条件，还与远距离处等离子体的状态有密切的联系。而长程作用力是把等离子体保持为一个整体的原因。

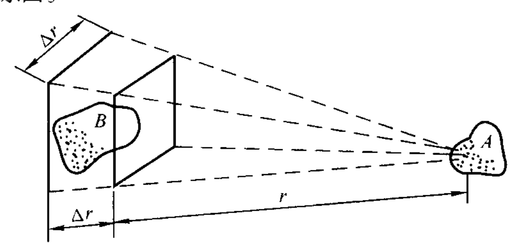


图 5.3-1 等离子体中的长程作用力

等离子体的其他特点还有很多，在此不多加赘述。下面只简要讨论与等离子体加工有关的某些基本属性。

1）德拜屏蔽效应 关于等离子体的准中性是指从整体上看，因为其中含有等量的正、负电荷，故对外不显示极性而呈电中性。但在小体积范围内可能偏离电中性而呈某种符号的电性。这种小体积的范围通常定义为德拜长度 λ_{De}（德拜屏蔽鞘层的厚度）。它实质上体现了等离子体对外界电场干扰的一种能力（图 5.3-2）。在等离子体内放进两个与外电源正负极相联的带电球，这两个球在等离子体内部引进一个电场。很明显，带电球会吸引等离子体内的异号带电粒子，在负球周围形成正离子层，在正球周围则形成电子层。如果等离子体温度很低，可以不考虑带电粒子的热运动，则当球外这一电荷层的厚度使得层中的电荷量与球上所带电荷正好相等时，将形成完整的屏蔽，这种效应称为德拜屏蔽效应。这时层外等离子体中完全没有电场，但实际上带电粒子总在热运动，层中的带电粒子会扩散到等离子体内，从而将干涉的影响带入，使该区域中出现局部电场。随与球的距离增加，这一局部电场迅速减小至零，可见实际上这种层的屏蔽是不完全的。通常，这一空间电荷层被称为鞘层。

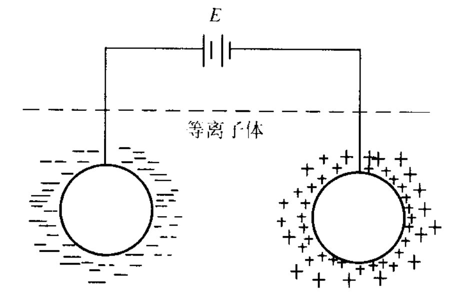


图 5.3-2 德拜屏蔽效应示意图

等离子体的一个重要特性是屏蔽效应。当某种外界干扰出现，破坏了等离子体的平衡时，等离子体具有屏蔽这些干扰的能力。通过推导可知当放电空间某一区域出现偏离电中性时，其中电位服从指数式衰减的分布：

$$V_{(r)}=\frac{e}{r}e^{-r/\lambda_{De}} \tag{5.3-1}$$

式中，λ_{De}被称为德拜长度。

这种屏蔽效应是等离子体势电荷所表现的“集合体行为”的结果。这也是等离子体的一个必要判据。

λ_{De}在数值上等于引入物电位降至其值的$1/e$时的空间距离。λ_{De}越小，等离子体抵抗外场干扰的能力越强。

通常λ_{De}由下式表示

$$\lambda_{De}=\left(\frac{\varepsilon_0 T_e}{en_e}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5.3-2}$$

式中，ε_0为真空电常数，$\varepsilon=8.854\times10^{-12}A\cdot s/V\cdot m$；$e$为电子电量，$e=1.602\times10^{-19}A\cdot s$；$n_e$为等离子体密度；$T_e$为电子温度。

实际中λ_{De}常以cm为单位，把上述常数代入则有

$$\lambda_{De}\approx743\sqrt{T_e/n_e}$$

此处T_e以V为单位，n_e以cm^{-3}为单位。借助德拜长度λ_{De}的概念，我们可更进一步认识等离子体电中性的概念。

假设由于某种扰动引起了等离子体内空间电位Φ的变化。同时造成电荷差$|n_i-n_e|$。那么在等离子体内空间尺寸线度l远大于λ_{De}的范围内（$l\gg\lambda_{De}$），据泊松方程进行估计有：

$$\nabla^2\Phi=\frac{e}{\varepsilon_0}|(n_i-n_e)|\sim\frac{\Phi}{l^2} \tag{5.3-3}$$

一般情况下我们期望（等离子体内部电势不足以约束电子）：

$$\Phi\leqslant T_e=\frac{en_e}{\varepsilon_0}\lambda_{De}^2 \tag{5.3-4}$$

上式已用到了德拜长度概念式（5.3-1）。综合式（5.3-3）与式（5.3-4）有

$$\frac{e}{\varepsilon_0}|(n_i-n_e)|\leqslant\frac{en_e}{\varepsilon_0}\frac{\lambda_{De}^2}{l^2} \tag{5.3-5}$$

$$\frac{|n_i-n_e|}{n_e}\leqslant\frac{\lambda_{De}^2}{l^2} \tag{5.3-6}$$

$\lambda_{De}^2/l^2\ll1$，式（5.3-6）意味着

$$|n_i-n_e|\ll n_e \tag{5.3-7}$$

因此可以认为

$$n_i=n_e \tag{5.3-8}$$

这就是电中性的含意。式（5.3-7）是等离子体准电中性的基本描述，通常称为等离子体近似。应该看到，在等离子鞘层范围内或固壁附近，由于鞘层厚度$S\sim\lambda_{De}$或电势$\phi\ll T_e$，泊松方程不能做近似处理，等离子体近似不成立。

等离子体准中性的简单含义，就是从整体上看它是电中性的，但在一个很小的体积内就有可能出现某一符号的纯电荷。因此德拜屏蔽效应对应着等离子体的体积尺度的问题。同时等离子体还存在时间尺度的问题，这就涉及到等离子体静电振荡。

2）等离子体振荡　等离子振荡是等离子体特征的又一种电子群和离子群的集合体行为。虽然，总的来说，等离子体中的电子和离子处于平衡状态，但这是许多瞬时和局部相互作用的统计平均结果。任何等离子体即使是其中的一部分，由于某种原因使其电中性受到微扰时，等离子体将立即产生恢复力以重新建立电荷中性。由于电子和离子的质量相差悬殊，惯性很小的电子将立即在恢复力作用下调整位置。而恢复力将与位移成正比，这正是形成振荡的条件。

① 电子振荡　如果等离子体中的电子相对离子有一位移，这两者间将建立起电场，电场方向是使电子趋向原先的位置，以保持等离子体的中性。但惯性将使电子冲过平衡位置，并以某一特征频率围绕平衡位置往返振荡。电子振荡的频率如此之高，以致离子对此振荡场无法响应，因此可以把离子看成是固定的。于是就有电子振荡频率：

$$f_{pe}=\left(\frac{e^2n_0}{4\pi\varepsilon_0 m_e}\right)^{1/2} \tag{5.3-9}$$

② 离子振荡　上面对电子振荡的讨论中，曾假设离子是均匀分布而固定不动的。实际上，和电子振荡一样，等离子体中的离子也将产生离子振荡。由于离子质量大，振荡频率比电子的低得多，可以认为产生离子振荡时电子始终保持热平衡状态。离子振荡频率的计算比电子复杂得多，在推导电子振荡频率时可以不计离子运动，而在推导离子振荡频率时则不能不考虑电子的运动。但当电子温度远高于离子温度时，离子振荡频率可以简化为和电子相同的形式。

3）双极扩散　实验发现，放电正柱等离子体中会出现正负电荷分离现象，对此应该从电子运动的特性来分析。我们知道，在相同的电场作用下，电子比离子轻得多，电子比离子得到更大的加速，所以电子运动得快；在浓度梯度作用下，电子比离子扩散得快，即使在热平衡状态下也是如此，这是因为电子的扩散系数比离子的大。在实际的放电室中，这两个效应使电子一开始就比离子更快地到达放电边界，电子移走后，放电中留下过剩的离子使放电空间出现过剩的正电荷。一旦出现了电荷分离，在电子空间电荷和正离子空间电荷之间就存在了电场，该电场趋向于减速电子和加速正离子。最后达到稳定的条件是正负两种粒子以相同的速度扩散，这样的扩散称之为双极扩散。

4）等离子体中两种温度　在热平衡下物体只具有一个温度，但是同一等离子体中可能同时存在几个不同的温度。因为离子之间或电子之间的能量平衡条件不同于离子和电子之间的平衡条件，每种粒子主要处于自身的能量平衡中，受它种粒子的影响较小，所以离子、电子和中性粒子具有各自不同的温度。有时直接采用能量相对应的kT（k为玻耳兹曼常数，T为绝对温度）来表示各种粒子的温度。粒子平均能量为1 eV时等离子体其温度是11 600 K。由于电子质量较小，因此电子在电场中获得能量比离子的大。在放电过程中电子和离子与中性粒子间发生着频繁的碰撞。但是，电子与重粒子发生弹性碰撞时只损失极小一部分能量，而离子从电场获得的能量则在频繁的碰撞中与中性粒子均分，结果是电子有高达2～8 eV的平均动能，而离子的平均动能却比中性粒子高得不多，中性粒子基本上仍保持室温下的平均动能。所以非平衡等离子体中的电子、离子和中性粒子具有不同的温度。

1.2　等离子体应用技术简介

低温等离子体物理与技术经历了一个由20世纪60年代初的空间等离子体研究向80年代和90年代以材料为导向研究领域的大转变，高速发展的微电子科学、环境科学、能源与材料科学等，为低温等离子体科学发展带来了新的机遇和挑战。60年代初，我国的低温等离子体及其应用随着航天技术中材料试验的需求而发展，当时主要是电弧等离子体技术。70年代开始了各种热等离子体材料加工技术研究，80年代低气压等离子体技术研究普遍开展。

现在，低温等离子体物理与应用已经是一个具有全球影响的重要科学与工程，对高科技经济的发展及传统工业的改造有着巨大的影响。例如，1995年全球微电子工业的销售额达1 400亿美元，而三分之一微电子器件设备采用等离子体技术。科学家预测：21世纪低温等离子体科学与技术将会产生突破。据估计，低温等离子体技术在半导体工业、聚合物薄膜、材料防腐蚀、等离子体电子学、等离子体合成、等离子体冶金、等离子体煤化工、等离子体三废处理等领域的



潜在市场每年达一千几百亿美元。

等离子体辅助加工被用来制造特种优良性能的新材料、研制新的化学物质和化学过程，加工、改造和精制材料及其表面，具有极其广泛的工业应用——薄膜沉积、等离子体聚合、微电路制造到焊接、工具硬化、超微粉的合成、等离子体喷涂、等离子体冶金、等离子体化工等。等离子体辅助加工已开辟的和潜在的应用领域包括：

1）半导体集成电路及其他微电子设备的制造；
2）工具、模具及工程金属的硬化；
3）药品的生物相溶性包装材料的制备；
4）表面上防蚀及其他薄层的沉积；
5）特殊陶瓷（包括超导材料）；
6）新的化学物质及材料的制造；
7）金属的提炼；
8）聚合物薄膜的印刷和制备；
9）有害废物的处理；
10）焊接；
11）磁记录材料和光学波导材料；
12）精细加工；
13）照明及显示；
14）电子电路及等离子体二极管开关；
15）等离子体化工（氢等离子体裂解煤制乙炔、等离子体煤气化、等离子体裂解重烃、等离子体制炭黑、等离子体制电石等）。

低温等离子体物理与应用对全世界的高科技工业发展及许多传统工业的改造都有着直接的影响，21世纪初等离子体辅助加工会产生重要的突破，而这些突破对高科技产业的发展及提高其在市场中的地位将是极为重要的。例如近十年来，低温等离子体的物理研究和技术应用在很多方面有了突破性的进展，最有代表性的是微电子工业中等离子体的应用。以"奔腾"芯片为代表的半导体微处理器的复杂生产过程中，三分之一是与等离子体有关的。而且随着高新技术的发展，等离子体技术已向各个领域发展——材料科学（新型材料合成、材料表面改性）、生物（等离子体育种）、电子（等离子体显示器，大规模集成电路制造）、环保（等离子体水、垃圾等的处理）、机械加工（切割、焊接、喷涂）、通信（等离子体天线）、能源（等离子体煤气化处理）、武器（粒子束武器、等离子体隐形）等等。

2 低气压等离子体

2.1 人造低温等离子体简介

低温等离子体通常是在密封容器内，一定的真空气氛下产生的。随着气体愈来愈稀薄，分子间距及分子或离子的自由运动距离也愈来愈长，在受电场或磁场作用下运动，使积累的能量越来越高直至分子间产生放电现象，主要是辉光放电，辉光放电时的气压大小对材料处理效果有很大影响，另外与放电功率、气体成分及流动速度、材料类型等因素有关。

其他放电方式还有弧光放电、高频及微波放电、介质阻挡放电等。不同的放电方式、工作物质状态及上述影响等离子体产生的因素，相互组合可形成各种低温等离子体处理设备。

理解气体放电过程对于控制等离子体产生及应用都有重要意义。此处只简要介绍一下最基本的放电形式——辉光放电。

辉光放电是一种自持放电，它是其他放电方式的基础，尤其对于理解溅射过程非常重要，一般分为亚辉光放电、正常辉光放电和异常辉光放电。

在真空室内的两端装上两个电极，里面充以气压约几百帕的气体，在电极上加上直流电压，随着电压的逐渐升高，电离粒子的运动也随之加快，即放电电流随电压增加而增加。当这部分电离粒子的速度达到饱和时，电流不再随电压升高而增加，即电流达到了一个饱和值，此值取决于气体中原来已经电离的原子数。当电压继续升高时，离子与阴极之间以及电子与气体分子之间的碰撞变得重要起来。在碰撞趋于频繁的同时，外电路转移给电子与离子的能量也在逐渐增加。电子碰撞开始导致气体分子电离，同时离子对于阴极的碰撞也将产生二次电子发射，这些均导致产生出新的离子和电子，即碰撞过程导致离子和电子数目成雪崩式的增加。这时，随着放电电流的迅速增加，电压变化却不大，这种放电过程被称为汤生放电。

在汤生放电的后期，放电开始进入电晕放电阶段。这时，在电场强度较高的电极尖端部位开始出现一些跳跃的电晕光斑，因此这一阶段被称为电晕放电。在电晕放电之后，气体突然发生放电击穿现象。电路的电流大幅增加，同时放电电压显著下降。这是由于这时的气体已被击穿，因而气体内阻将随着电离度的增加而显著下降，放电区由原来只集中于阴极的边缘和不规则处，变成向整个电极上扩展。在这一阶段，导电粒子的数目大大增加，在碰撞过程中的能量也足够高，因此会产生明显的辉光。电流的继续增加将使辉光区域扩展到整个放电长度上，辉光亮度提高，电流增加的同时电压也开始上升。这是由于放电扩展至整个电极区域以后，再增加电流就需要相应地提高外电压。上述的两个不同辉光放电阶段又常被称为正常辉光放电和异常辉光放电阶段。异常辉光放电是一般溅射方法常采用的气体放电形式。随着电流的继续增加，放电电压将再次突然大幅度下降，电流剧烈增加。这时，放电现象开始进入电弧放电阶段。

在辉光放电时，放电腔有明显的放电辉光产生，呈现阴暗相间的光层分布，分为八个不同区域：阿斯顿暗区、阴极辉光区、阴极暗区、负辉区、法拉第暗区、正柱区、阳极暗区、阳极辉光区。其中暗区相当于离子和电子从电场获取能量的加速区，而辉光区相当于不同粒子发生碰撞、复合、电离的区域。在阴极附近有一明亮发光层，它是由向阴极运动的正离子与阳极发射的二次电子发生复合所产生的，被称为阴极辉光。阴极暗区是二次电子和离子的主要加速区，这个区域的电压降占整个放电电压的绝大部分。负辉区是发光最强的区域，它是已获得加速的电子与气体原子发生碰撞而电离的区域。上面对于放电区的划分是一种比较典型的情况，实际上具体的放电情况可根据放电容器的尺寸、气体的种类、气压、电极的布置、电极材料的不同有所不同。

目前不同放电方式在工业及科研中都有应用，例如在大气压下的电晕放电和弧光放电就已被应用到生物医学上。

2.2 低气压等离子体发生器

低气压等离子体源的优点在于：击穿电压小，电流更容易控制，低气压等离子体源能产生大面积均匀的等离子体和容易控制的电子密度。

等离子体源就是用某种方式产生或获取等离子体的装置。在实际应用中，等离子体均是通过某种放电方式产生，例如射频（RF）放电、微波放电、脉冲或直流模式的辉光及真空弧放电等。因此，一种等离子体源对应一种放电方式。随着等离子体技术的发展，现已开发出多种等离子体源应用于各种等离子体加工工艺。这里简单介绍几种比较基本的等离子源。

等离子体又可进一步分为非凝结的（如气体等离子体）及可凝结等离子体（如金属等离子体）。气体等离子体不会在基体表面形成薄膜或涂层。相比之下，金属可凝结等离子

体源即可形成薄膜或涂层。

1）热灯丝等离子体源　大多数早期的等离子体加工系统，一般利用简单的热灯丝放电产生等离子体、并排布永磁铁来加强等离子体密度。该方法是最通用的产生等离子体的简单手段。通常把数根灯丝（最常用的为钨丝）置于真空室中并加热至发射温度。然后由另一电源将热灯丝偏置于相对真空室（地电位）的某一负电位（通常 < 200 V）。这样即可产生等离子体，其密度一般为 10^9 cm^{-3}。图 5.3-3 即为一种热灯丝发射并由多极磁铁约束的等离子体源。

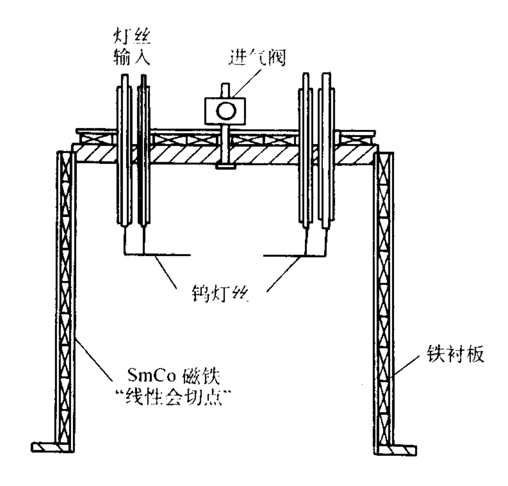


图 5.3-3　热灯丝发射电子产生等离子体源示意图

2）射频放电等离子体源　射频等离子体源近年来也被常常用于离子注入等加工工艺。它又分为电容耦合及电感耦合两种类型。电容耦合产生的等离子体密度较低，适合于特征尺寸较大的零件注入。

在高密度等离子体注入及保形注入的情况下必须使用电感耦合等离子体（ICR，Inductively Coupled Plasma）。实际上它是一种很简单的等离子体源，一般不需要磁铁约束，可在较宽的气压范围内提供纯净的大体积等离子体。在过去 ICP 源工作在高气压范围（100 Pa 或几个大气压）用以加热或照明。最近 ICP 源又重新开发用于半导体及其他工业领域，成为很重要的高密度、低气压等离子体源。图 5.3-4 与图 5.3-5 为射频天线耦合与几种类型的 ICP 等离子体源示意图。绝缘体与线圈可制成各种形状，以适用不同的工艺要求。其中凹入式形状不常见，但对小尺寸进出口的 PIII 装置非常有用。射频频率一般取 13.56 MHz。

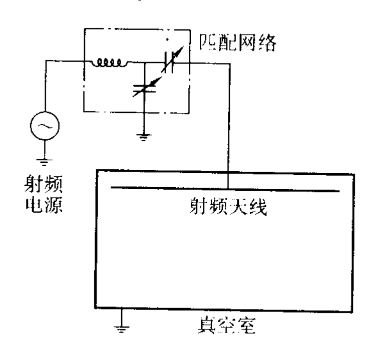


图 5.3-4　RF 电容耦合（天线）等离子体装置

ICP 等离子体源可以脉冲方式工作。这样不但可以节省平均功率，而且可以提高脉冲功率峰值（10 ~ 50 kW），从而可以获得更高的平均等离子体密度。

能产生等离子体的方式很多，各种等离子体源各有特点，应结合具体情况而选择何种放电方式。各种电离气体的等离子体密度及电离度如图 5.3-6 所示。

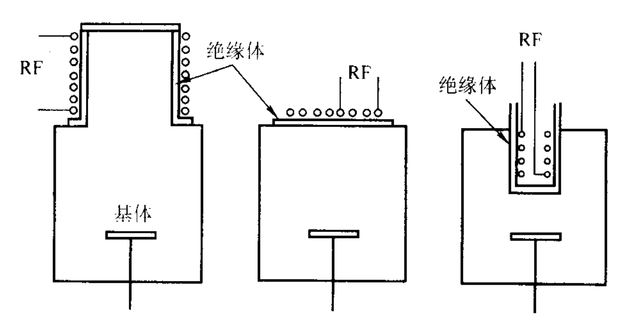


图 5.3-5　几种类型的电感耦合装置

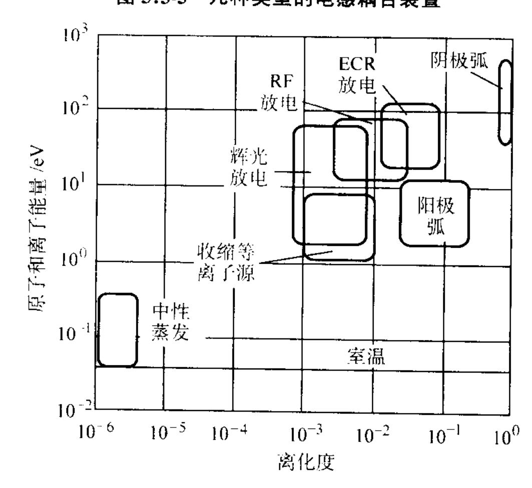


图 5.3-6　各种等离子体电离度

由于射频放电等离子体源能够产生大容量稳定等离子体而被广泛应用。按照射频能量耦合方式它有两种类型——电感耦合和电容耦合射频放电源。两种方式分别用外部电极及内部电极耦合。外部电极一般采用玻璃放电管（石英或硼化玻璃），其外为电感线圈，这主要是为了消除电极及真空室壁材料对等离子体的污染。这是射频等离子体源一种常用的放电装置，另一种是在真空室内放置两个电极，在两个电极间产生辉光放电得到等离子体，这种装置有电极污染，但在沉积薄膜时效率很高，因此也得到广泛应用。

通常射频电源采用工业频率 13.56 MHz，放电气压一般在 10^{-3} ~ 100 托之间。在低气压 10^{-3} ~ 1 托之间射频等离子体源的电子密度在 10^9 ~ 10^{11} cm^{-3} 之间变化。而在中等气压（1 ~ 100 托）电子密度能达到 10^{12} cm^{-3}。射频放电等离子体中电子温度是几电子伏，而离子温度很低。射频等离子体源有很好的均匀性，这是其在工业上得以广泛应用的主要原因之一。

3）微波等离子体源　微波等离子体源由于其一系列优点而越来越多地被人们采用。从目前来看微波等离子体源有下列优点：

离化率高；

等离子体纯净；

无电极放电（可适用于反应性气体）。

微波等离子体源大多采用电子回旋共振（ECR，Electron Cyclotron Resonance）的放电方式产生等离子体。大体分为三部分：微波系统，放电室，ECR 磁场。

微波等离子体源是通过波导管将微波输入真空室，放电系统中的电子通过吸收输入的微波能量而获得动能，与真空室内的中性粒子发生碰撞而产生等离子体。当激励放电电源的频率从射频波段（13.56 MHz）提高到微波波段（2.45 GHz），产生的等离子体的性质发生很大的变化——它们的传输方式迥然不同。射频的传输基本上通过电路实现，放电空间建立的电场都是纵向电场。微波在波导内以横电波或横



磁波的方式传播，因此波导内场的能量转化，无需用电极也无需用电感耦合线圈，不存在电极污染问题。

当在放电腔外围安置磁场线圈，如果线圈通有电流时能够产生 875 G 的磁场，并且此时微波频率和电子在磁场中的回旋频率相等，便可以产生电子回旋共振（ECR）进而产生等离子体。发生这种共振时，电子将在微波场中最有效地吸收能量。通常 ECR 等离子体源的工作气压在 $10^{-5} \sim 10^{3}$ 托。电子密度能很容易达到 10^{11} cm^{-3}，在低压条件下能达到更大的电子密度（超过 10^{12} cm^{-3}），由于电子和粒子之间的高碰撞概率，所以产生的离子密度也很高。但等离子体的分布不均匀，并且电子的温度比离子的温度要高得多。关于微波等离子体源将在本章“3.2.3”中有较详细的介绍。

4）真空弧等离子体源　通常真空弧等离子体源由两部分组成：等离子体产生部分和大颗粒粒子过滤部分。等离子体产生部分包括阴极、阳极和触发极。在触发极加上负高压脉冲即可引燃阴极和阳极之间的弧光放电。弧光放电电流集中，在阴极靶表面形成局域非平衡的、高电流密度的阴极斑点（10^{12} A/m^2）。高电流密度导致极高的局域能量密度（10^{13} W/m^2），这为局部性的相转化提供了条件，使固体阴极表层材料蒸发后几乎全部离子化形成高密度等离子体。在阴极斑点产生的等离子体迅速扩散到真空室的其他空间。按照轻粒子能量 20 eV，重离子 200 eV 估算，离子典型速度在（0.5～2.0）$\times 10^4$ m/s 之间。

阴极斑点不但产生高效离子化等离子体，而且会产生大颗粒粒子，因此还要有过滤装置，过滤器一般是通过施加电场和磁场来实现，这样不但可以过滤大颗粒粒子而且可以调整入射角度。目前通常使用弯曲管（管外安放线圈）式磁过滤器。真空弧等离子体源的优点是阴极材料离化率高，并且任何导电材料都可以作为阴极。电离度可接近于 1。然而由于等离子体束流速度高，在传输过程中扩散影响小，因此等离子体束流在轴向和径向都很不均匀。

5）激光等离子体源　激光等离子体源是通过高密度激光脉冲和固体靶的相互作用产生等离子体的。它包括激光与固体相互作用和等离子体产生两个过程。

在低密度激光注入时，通过激光脉冲前沿产生蒸发，并且激光束可以几乎毫无损失地通过蒸气，这种情况下蒸发从液态金属中产生，并且热能主要传给了固体靶。在高密度激光注入时，蒸气温度达到足够高，使被照原子激发并离化。这种情况下蒸气开始吸收激光辐射导致蒸气放电等离子体产生。等离子体的产生有两种机制：反转轫致辐射（IB）和直接光离化（PI）。IB 主要发生在红外激光等离子体源中，PI 主要发生在可见和紫外激光等离子体源中。

激光等离子体源中激光密度一般在 $10^{8} \sim 10^{10}$ W/cm^2 之间。靶材应选能吸收激光辐射的金属及复合材料，并且引入气体的耦合及气体等离子体要同时产生，这样可以弥补蒸发过程中气体的损失。随着激光和靶的距离加大电子密度呈指数减小，最大只能达到 $10^{18} \sim 10^{21}$ cm^{-3}。电子温度在 1～5 eV，并且离子温度和电子温度相当。但是由于在靶前等离子产生率很小并且等离子束流速度很大，因此实际上大面积均匀激光等离子体很难产生。

6）潘宁等离子体源　潘宁源是电子振荡型等离子源的一种。工作原理是从阴极发射的电子通过中间的阳极而加速，同时对面的阴极使电子向后反射，而轴向磁场也会使电子向后反射，因而电子不能很快地到达阳极。因此，电子在两阴极间来回振荡。电子在振荡过程中，与气体原子发生碰撞并使其电离的概率大为增加，从而形成等离子体。

7）中空阴极等离子源　这也是一种电子振荡型等离子源，在中空阴极和圆筒状阳极之间形成等离子体。被电离的物质可以是气体或固体。固体放在导管顶端的坩埚中。导管的位置可以左右移动，调整它与等离子体的相对位置，从而控制被电离物质的温度，以获得合适的蒸气压。

2.3　等离子体诊断技术

等离子体参数的测量或称等离子体诊断，在等离子体技术领域是非常重要的学科分支，其中等离子体密度检测是其重要内容之一。因为等离子体密度在任何等离子体加工工艺中都是最重要的参数之一。不论何种工艺，在进行加工或试验以前，均必须对等离子体密度进行测量。等离子体密度的检测有多种方法，最常用的是朗缪尔（Langmuir）探针测量法（1924 年 Langmuir 提出）。另外还有质谱分析法、吸收光谱法、激光诱导荧光光谱法、以及微波诊断法等测量技术。

2.3.1　单探针基本原理

有关等离子体参数测量问题目前已发展成为一门新的技术学科——等离子体诊断技术，并涉及很宽的专业面。下面简要介绍常用的静电单探针方法及测量结果。静电探针是最简单的一种测量方法，在实验室也容易实现。静电探针是朗缪尔首先提出的测量方法，所以又叫朗缪尔单探针（Langmuir Probe），由于其结构简单使用方便，是研究低温等离子体的重要手段。另外还有双探针、发射探针、质谱、光谱等诊断方法。这些诊断方法所针对的对象各有不同。

1）静电单探针基本原理　将一金属丝（称为探针）置于等离子体之中，在探针上加上由负到正的偏压 U_p（一般为负几十伏到正几十伏），如图 5.3-7，便构成了静电单探针电路，在调节探针电位的过程中，等离子体的状态保持稳定。由负到正逐渐调节探针电位，则可得探针伏安特性曲线（不同电压下探针接收到的电流），如图 5.3-8 所示，根据此曲线可估算等离子体的电子温度，浓度等参数。单探针 $I-V$ 特性曲线可分为 A、B、C 三个区域。

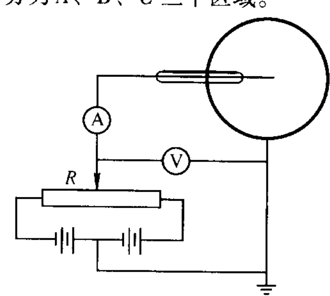


图 5.3-7　单探针测量电路

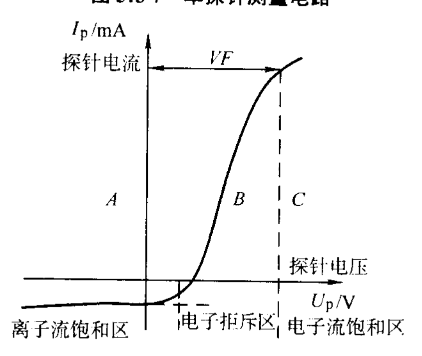


图 5.3-8　单探针所测等离子体的伏安特性

A 区：饱和离子电流区。在该区，探针电位（V_p）远远小于等离子体空间电位（V_{sp}），即 $V_p \ll V_{sp}$。此时，全部电子都受鞘层拒斥场的作用不能到达探针表面，只有正离子能被探针收集，显然，该数值由等离子体的性质（n_i 与 $\bar{v}_i$）决定，而与鞘层电场大小无关。探针所能收集到的最大离子电流密度，称为饱和离子电流密度，将其乘以探针暴露在等离子体里的总面积，即为探针饱和离子电流。



B区：过渡区。该区的情形稍为复杂一点。在该区，$V_p < V_{sp}$，因此，落在鞘层表面的正离子全部能到达探针表面，构成探针电流（I_p）的一部分；由于它在数量上较电子电流小得很多，为了方便起见，往往忽略它对 I_p 的贡献，只考虑电子电流。在该区，等离子体中电子能量分布函数接近 Maxwell 分布。为了方便起见，我们暂时假定电子能量分布为 Maxwell 分布。当 $V_p - V_{sp}$ 变得越来越负时，能够克服拒斥场的作用而到达探针表面的电子数也就越来越少。实际上，能够克服拒斥场的作用而到达探针的电子数是对 Maxwell 分布函数的积分。显然，此积分函数具有指数函数的性质。所以，在过渡区探针电流（I_p）具有指数函数的形状。

C区：饱和电子电流区。与A区的情形类似，在该区，$V_p \geqslant V_{sp}$，此时全部正离子都受鞘层拒斥场的作用不能到达探针表面，只有电子能被探针收集。这些电子也就是到达鞘层表面的那些电子，同样，该数值由等离子体的性质（n_{e0}，$\bar{v}_e$）决定，而与鞘层电场的大小无关。探针所能收集到的最大电子电流密度，称为饱和电子电流密度。将其乘以探针总面积即为探针饱和电子电流。

设 U_p 是探针在等离子体中的电位 V_p 与等离子体的悬浮电位 V_F 之和

$$U_p = V_p + V_F \tag{5.3-10}$$

因而探针电位

$$V_p = U_p - V_F \tag{5.3-11}$$

试验采用的电路如图 5.3-7 探针所加偏压为 U_p（-30 V，$+30$ V）。调节探针偏压可测得如图 5.3-8 所示的伏安特性。横坐标是探针电压 U_p，纵坐标是探针电流 I_p。因为探针同时接受到电子流与离子流，故有 $I_p = I_e - I_I$ 即电流表读数为探针接收到的电子流与离子流之差。假定等离子体中的电子和离子的速度服从麦克斯韦分布并按余弦定律打到探针表面，则到达探针表面的电子流和离子流分别是

$$I_{e0} = \frac{1}{4} e n_e S_{pe} \bar{v}_i = \frac{1}{2} e n_e S_p \sqrt{\frac{2kT_e}{\pi m e}} \tag{5.3-12}$$

$$I_{i0} = \frac{1}{4} e n_i S_p \bar{v}_i \tag{5.3-13}$$

式中，I_{e0}、I_{i0} 为等离子体能提供的饱和电子流与离子流，mA；n_{e0} 为电子浓度，cm^{-3}；n_{i0} 为离子浓度，cm^{-3}；S_p 为探针表面积 cm^2；T_e 为电子温度，eV；k 为玻耳兹曼常数；$\bar{v}_e$、$\bar{v}_i$ 为电子和离子的平均速度。

当 $V_p > 0$（$V_p = U_p - V_F$）时，探针周围形成电子鞘层，到达探针上的离子流将趋于零，因此，探针上的电流 I 趋于 I_{e0}，将各常数代入前式可得

$$I_{e0} = 2.67 \times 10^{-9} n_e S_p \sqrt{kTe} \tag{5.3-14}$$

当 $V_F < V_P < 0$ 时，即在 $V—I$ 特性的中间部分（亦称为过渡区），这时探针电流为电子流与离子流之差，因为只有那些能够克服探针表面负电位的电子才能到达探针表面，因而其电子流将随负电位的变大而减小。因为电子要克服势能 eV_p 才能到达探针，所以探针上的电子流随 V_p 的变化应服从玻耳兹曼分布：

$$I_e = I_{e0} \exp\left(\frac{eV_p}{kT_e}\right) \tag{5.3-15}$$

探针电流：

$$I_p = I_{e0} \exp\left(\frac{eV_p}{kT_e}\right) - I_{i0} \approx I_{e0} \exp\left(\frac{eV_p}{kT_e}\right) \tag{5.3-16}$$

两边取对数：

$$lnI_p = lnI_{e0} + \frac{eV_p}{kT} \tag{5.3-17}$$

$$kTe = \frac{eV_p}{\ln Ip - \ln I_0} \tag{5.3-18}$$

故此，把试验测出的伏安特性做半对数曲线，则直线部分的斜率即为电子温度：

$$kT_e = e(V_{p1} - V_{p2}) / (\ln I_{p1} - \ln I_{p2}) \tag{5.3-19}$$

得到电子温度 kT_e 之后，再由 $V—I$ 特性估计读取饱和电子流 I_{e0} 之值，利用饱和电子流与电子密度的关系式即可得出等离子体的电子浓度和离子浓度：

$$n_{e0} = 3.74 \times 10^8 I_{e0} / (S_p \sqrt{kT_e}) \tag{5.3-20}$$

式中，I_{e0} 为饱和电子流，mA；S_p 为探针面积，cm^2；kT_e 为电子温度，eV；n_{e0} 为电子浓度，cm^{-3}。

当 $V_P < V_F$ 时，电子电流进一步减小，最后探针电流趋于饱和离子流 I_{i0}，但此时已不能再用上面的 I_{i0} 表示，因为这时探针表面附近离子温度和密度都已发生变化，并不等于离子鞘层外等离子体的原来数值。事实上，饱和离子流仍主要与 T_e 有关，可近似的表示为

$$I_{i0} = 2\alpha n_i Ze \sqrt{\frac{2kT_e}{mi}} S_i \tag{5.3-21}$$

式中，α 为 0.4～1 之间的系数，Z 为离子价态数。

2）单探针的结构　单探针如图 5.3-9 所示，一般采用高熔点的金属（如钨、钼、铂等）作为探针材料。进入探针的屏蔽体（如玻璃管、陶瓷管等）内后，用电火花点焊法与镍丝连接，经真空密封处理后引出屏蔽体。在探针进入屏蔽体处，给探针套上一适当的铜丝环，并将其推入屏蔽体内，以刚好不露出为宜。这样可保障探针恰好位于屏蔽体内孔的中心，而不与孔边相接触。即使屏蔽体外表面被沉积上了导电膜，探针也不会与导电膜接触。因此能确保探针的有效面积不变。对于等离子体溅射沉积等情况，这是特别重要的。关于探针的粗细，原则上讲愈细愈好，因为探针愈细，对等离子体的干扰就愈小，目前已有采用直径为微米量级的探针。但是太细也导致制作困难，通常，采用直径为零点零几毫米至零点几毫米的难熔金属丝，同时要特别注意保持探针表面的清洁，表面的微小锈斑与污物要加以仔细清除，否则探针的测量会产生较大误差。

Langmuir 单探针 $I-V$ 特性曲线的拐点原则上讲，单探针 $I-V$ 特性曲线应该有明确的拐点，但是，实际上，由于探针的边缘效应（即有限表面积）等原因，当 $V_p > V_{sp}$ 之后，V_p 继续增大时，鞘层表面积随之增大因此落到整个鞘层表面的电子数继续增加。既然落到鞘层表面的电子都能落到探针上，故探针电流 I_p 也继续增加，使得拐点变得难以确定。这就是用单探针不能准确测定等离子体空间电位 V_{sp} 的主要原因。人们发现，发射探针法（包括可直接指示等离子体空间电位的差分发射探针）与激光诱导荧光（LIF）法等可以较准确地测定 V_{sp}。

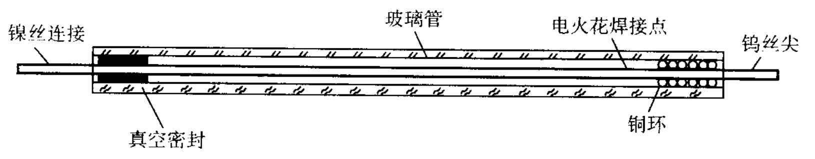


图 5.3-9　Langmuir 单探针的一般结构



2.3.2 发射探针

由于单探针的边缘效应（即有限表面积）等原因，用单探针不能准确测定等离子体空间电位 V_{sp}，但用发射探针法（包括可直接指示等离子体空间电位的差分发射探针）可以较准确地测定 V_{sp}。发射探针（连接电路如图5.3-10）的基本原理是只有在等离子体电位以下，加热偏压增加，发射电流才随之增加。悬浮电位即电流为零时的电压，当发射电流增大时，发射探针的悬浮电位会逐渐接近等离子体电位。等离子体电位能够通过发射探针的开环电压近似得到，这种方法比找单探针拐点要简单得多。没有电流时的发射探针要比有电子饱和电流的单探针对等离子体干扰小。不利的是它需要加热供电，这使得它仍不能准确测量等离子体电位。发射探针的 $I-V$ 特性曲线与微分电阻 dV/dI 成反比，并认为探针为电压源，用伏特表来限定负载电阻，进而降低内阻减小测量误差。在以往实践的测量中探针的内部电阻和外部电容决定探针时间分辨率。发射探针最初用于电场的测量，等离子体的电场是由等离子体电位梯度决定的（$E=-\text{grad}V_{plasma}$）。冷探针电位梯度对温度和一次电子很敏感，因此对电场测量模糊不清，为了不移动探针测量瞬时电场，常用双发射探针。现在有人用可以直接显示等离子体电位的差分发射探针来测量，具体电路如图5.3-11，主要增加了一个自动反馈电路，另外虽然探针 A、B 都被加热，但探针 A 不发射，对它加热的目的只是为了消除污染，而探针 B 被加热到发射状态。

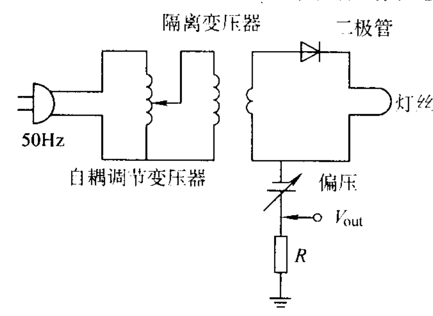


图5.3-10 单发射探针电路

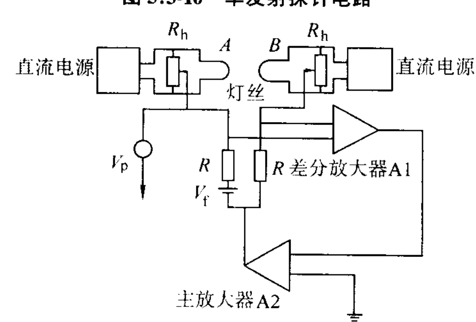


图5.3-11 双发射探针电路

2.3.3 质谱诊断概述

利用质谱技术可以探测放电等离子体中的离子组成，以及这些组成在过程中的变化情况。因此质谱诊断技术不仅可以用来对低温等离子体设备进行评价，还可作为一种实时监测的重要手段。质谱诊断法可采用的质谱仪种类很多，各种质谱仪都是由离子源、分析器和检测器三部分组成。离子源用来进行气体取样，由放电室放电形成离子，并由离子引出系统引出离子束。分析器是利用离子光学系统，按不同的荷质比分离离子束中的离子，并把所需的具有特定荷质比的粒子送入检测器。而检测器实际上是一个法拉第杯，测量收到的离子流强度。

2.3.4 光谱诊断概述

光谱诊断法包括红外光谱、紫外光谱、激光诱导荧光光谱等多种方法，主要是用来检测等离子体中的气氛组成。由于微波等离子体的广泛应用，而激光诱导荧光光谱正是检测微波等离子体成分的有效手段之一，故此处只重点介绍一下激光诱导荧光光谱。

激光诱导荧光（LIF）是利用可调谐的燃料激光有选择地激发等离子体中的某种元素至某一激发态；当该发射态退激时，便放出荧光，在非饱和条件下，荧光强度与激光功率以及该元素的浓度有关。早期在分析化学中应用较多的原子荧光谱学就是这种情况。随着相关技术的进步，燃料激光的输出功率大为提高。当激光功率密度高到某种水平后，激发态除了通过自激发跃迁发射荧光外，还可通过受激发射而退激发，这时激光强度的进一步提高，并不会引起荧光强度的提高，这就是所谓饱和现象。所以，在饱和条件下，荧光强度只与该元素的浓度有关。这时，利用激光诱导荧光进行粒子浓度的绝对测量变得较为简单，而且精度也相应提高。其优点是：高分辨率，可达到亚微米量级；快的时间响应，时间分辨率可达亚纳米量级；高灵敏度，探测下限约为 10^6 个粒子/cm^3；与电子密度、电子温度无关；对等离子体与鞘层的状态无干扰。

3 低温等离子体加工技术及应用

等离子体加工技术是现代加工技术的一个分支，西方发达国家已经将其广泛应用于生产中，而我国许多技术仍处于实验室研究阶段。工业化水平的提高需要现代加工方法的发展，因此我们必须加快等离子体加工技术的发展。这里简要介绍离子注入材料表面改性、等离子体沉积、等离子体刻蚀、等离子体聚合等技术以及它们的应用。

3.1 低温等离子体技术对材料的表面改性技术

科学技术的飞速发展对使用材料的综合性能提出了更高的要求。尤其是材料或零件的表面性能显得日益重要。表面工程在其成为一门独立学科不长的时间里，其发展速度之快、涉及范围之广、对人类生活影响之大，已达到令人惊奇的程度。用低温等离子体技术沉积薄膜或对材料表面进行处理，可以使材料的表面性能得到很大提高。例如：在机械、电子等材料表面沉积硬质、耐磨、防腐薄膜，或对其表面进行注入改性，可以极大地提高材料的力学性能。在电子、光学器件上沉积微电子、光学薄膜，可以提高其电子、光学性能。对医用材料进行处理，可以提高防腐抗蚀及生物相溶性等性能。用低温等离子体技术处理纤维、羊毛等高分子材料，可提高其纺织及使用性。概括说来，等离子体在材料表面改性及涂层技术应用领域包括以下几个方面。

（1）低温等离子体技术制备硬质、防腐、耐磨及热防护涂层

1）硬质涂层 用等离子体化学气相沉积（PCVD）可以制备硬质涂层，它的优点在于可以方便地实现对大量的部件同时进行涂层沉积。同时，变换不同的气体组分可以制备不同的涂层。例如：TiN：$TiCl_4/N_2/H_2$，$TiCl_4/CH_4/H_2$，Al_2O_3：$AlCl_3/CO/H_2$。在沉积时，同时引入不同的反应气体就可以制备多元涂层，如Ti（N，C）或（Ti，Hf）等。其显著的优点是具有更高的硬度、强度和耐磨性。按一定顺序变化气体就可以实现多层涂层的顺序沉积。如果在WC刀具上制备涂层就可以按照TiN/TiCN/TiC的顺序沉积，这样可以充分发挥TiC与基底材料WC附着力好的特点。还可以按照 $TiN/Al_2O_3/TiC$ 的顺序沉积，充分发挥 Al_2O_3 热导率低，对刀具切屑热有阻挡作用，TiN摩擦系数小，具有化学稳定性好等特点。

用等离子体物理气相沉积（PVD）也可以制备各种硬质涂层。物理气相沉积的主要优点在于其沉积的温度范围明显低于CVD方法，因而适用于沉积温度不能过高的各类钢制



零件的涂层处理，并可以减少零件变形，元素扩散影响附着力等可能出现的问题。用PVD方法制备的涂层晶粒组织更为细小，因而它具有较CVD涂层更高的硬度。

2）耐磨、防腐、耐热涂层　耐磨、防腐、耐热涂层的制备方法与硬质涂层基本相同，等离子体物理、化学气相沉积都可以制备。

① 耐磨涂层　一般是由硬度极高的材料制成的，其典型应用的例子是各种切削刀具、模具、工具和摩擦零件的TiN和TiC涂层。

② 耐热涂层　被广泛应用于燃气涡轮发动机等需要较高温度使用的机械部件的耐热保护方面，其作用一是要降低部件的表面氧化倾向，二是要降低或部分地隔绝部件所要承受的热负荷，从而延长部件的高温使用寿命。为了进一步提高发动机效率，一个有效的途径就是对发动机叶片施加热防护涂层。通常是有一层金属涂层和一层氧化物涂层。这样可以有效提高材料的使用温度。

③ 防腐涂层　防腐涂层的种类依要求防护的材料和使用环境的不同而有很大的差别。

阳极防护性涂层。Zn、Al、Zn－Al等合金的涂层可以依靠涂层自身较负的电极电位，提高涂层的钢铁材料抵抗各种大气及海水侵蚀的能力。这时，涂层本身作为阳极，保护了作为阴极的钢铁基底。

各种镍铬合金涂层。镍铬合金的耐热性能和高温耐酸碱腐蚀的性能好，而且致密性高、耐磨性好，与高铁材料基底有较强的附着力，是制备耐热、耐蚀涂层的典型材料。

陶瓷材料涂层——陶瓷材料一般均具有较好的抗腐蚀性能，还具有较好的耐热性能和耐磨性能，因而也可被用来制造耐蚀涂层。像ZrO_2涂层，Al_2O_3、Cr_2O_3以及其复合氧化物。

（2）等离子体气相沉积合成新的微电子、光电材料薄膜

1）微电子薄膜　微观结构上无缺陷、粘附力好的薄膜沉积，对微电子器件的制造至关重要。但器件结构对温度很敏感，高温沉积可能会损坏器件性能。例如，掺杂原子被注入硅中，制成晶体管的源极和漏极之后，必须严格控制晶片处于高温阶段的时间以避免掺杂物的扩散。当器件缩小、掺杂区域变得很薄时，则晶片的热量积聚就要求更严格的限制。因此目前的高温沉积方法必将被低温等离子体方法所取代。

由于低压等离子体的非平衡特性，高温薄膜可以在低温条件下沉积制得，甚至可以沉积出即使在高温平衡条件下也不能得到的具有特定化学成分和结晶形貌的薄膜，如表5.3-1。

表5.3-1　等离子体方法生长和沉积的新光电材料

材料	应用	方法①
氟高聚物	夹层电介质	PECVD
金刚石	散热片、晶体管	PECVD，TPCVD
碳化硅	散热片、晶体管	PECVD，TPCVD
高温超导体	联结线，高速	喷涂，溅射，TPCVD
化合物半导体	光电子，高速	PECVD
纳米晶	数据存贮，光电子	TPCVD，溅射，PECVD
钢②	联结线	PECVD

① PEVCD等离子体增强化学气相沉积（低气压）TPCVD热等离子体化学气相沉积（高气压）。

② 钢目前还没有应用于微电子器件中。

例如金刚石和碳化硅的热导率高、能隙大，作成微电子器件在高速、高温、抗辐射电子学方面的应用很有希望。可设想电子器件可以在几百摄氏度下工作而无需冷却，低成本微电子等级的金刚石和碳化硅器件将使电子学系统设计发生一场革命。PECVD和TPCVD这两种方法都已用于沉积金刚石和碳化硅膜。PECVD对沉积用于微电子器件的均匀薄膜更具吸引力，而TPCVD则更适宜于高速率沉积用作散热片的厚膜。

化合物半导体的PECVD也是一个大有希望而且极其活跃的研究领域。这类技术可用于量子阱、超晶格以及许多未来电子器件的制备上。等离子体方法虽然有快速、大面积沉积的能力，但沉积出的膜在性能上与化学气相沉积或分子束外延相比，目前得到的薄膜质量要略差一些。这种工艺的低温沉积得到的膜的表面形貌及污染状况不很理想。通过调整诸如离子流量和轰击能量等参数，以及用脉冲等离子体技术等可能将克服这些问题。在这些问题上取得突破，将导致在制造技术及相关专业方面的较大进展。

2）光电薄膜材料的制备　随着高新技术的发展，器件的集成度越来越大，因此光电材料得到大力开发和研制。光电材料种类有很多。其中以GaAs为基础形成的光电子材料最为常见。它包括AlGaAS、InP、GaInAsP等，它们是一般制作光电子器件常采用的材料。制备方法多样，像MOCVD等离子体技术等。GaAs类材料是极好的光电子材料，已被广泛用来制造各类发光器件（发光极管等）和光接受器件（光电二极管等）。因而，采用这类材料的优点是可以用外延、光刻技术将光发射、光探测器件以及光波导集成制作在同一块机板上。而改变$Al_xGa_{1-x}As$的成分不仅可以改变材料的禁带宽度，还可以调整材料对光的折射率。另外采用中子照射的方法也可以通过降低材料中载流子密度，提高材料折射率，从而在GaAs材料中制备出光波导。另外一类是以$LiNbO_3$为代表的具有特殊光电性质的单晶材料。这类材料具有较强的光电效应，即它的折射率随外加电场改变呈现较大的变化。因此，在这种材料上可以集成制作电光调制器和光电开光等元件。另外，由于这种材料还有较强的压电效应，因而用它还可以集成声光调制器和光折射器等主动型元件。可以采用离子注入等方法在$LiNbO_3$晶体上制作出光波导。第三类材料是包括了各种多晶和非晶的物质，如氧化物、玻璃以及聚合物等，这里就不再详细介绍了。总之，光电薄膜材料主要由等离子体化学气相沉积来制取，另外离子注入技术也是制备光电薄膜的一个重要手段。

（3）制备多功能薄膜

金刚石是碳的一种同素异构体，它是一种具有优异物理性能的材料，在已知物质中具有最高的硬度、耐磨性和弹性模量、极高的电阻率及热导率、很低的介电常数、宽的光谱透过范围、极高、极低的线胀系数、很宽的禁带宽度、极高的载流子迁移率及极高的化学键稳定性等。类金刚石膜（DLC）是由无定形碳和金刚石相混合组成的碳材料，由于具有与金刚石膜（DF）相类似的性能及生物相溶性，而且制备方法较金刚石简单（用等离子体化学、物理气相沉积都可以制取），因此得到了大力开发应用，由于许多金刚石能用到的地方类金刚石也能用到，但类金刚石能用的地方金刚石却用不到，所以这里只介绍类金刚石的应用。

1）力学性能上的应用　由于DLC膜的硬度及抗腐蚀性优越，可广泛应用于防止金属化学腐蚀和表面划伤。例如：①从大钢片到小铁钉、丝锥等插入式机械工具镀上DLC膜后，其中有些可以暴露空气中长达7年之久而无损坏。最近美国的Gillette公司推出新产品——镀类金刚石膜的“MACH3”的剃须刀片，它利用了类金刚石膜的耐磨性和润滑两方面特性，使剃须刀更加锋利、舒适。②类金刚石膜还可以作为磁介质保护膜。将磁盘、磁头或磁带表面涂覆很薄

的类金刚石膜后，不仅可以极大地减小摩擦磨损和防止机械划伤，提高这些磁记录介质的使用寿命；而且由于类金刚石膜具有良好的化学惰性，使抗氧化性提高，稳定性增强。在应用上类金刚石的另一令人感兴趣的机械属性是疏水性和低摩擦性，例如在汽车发动机中的移动部件上镀膜，可以使磨损率明显降低。

2）电子器件上的应用　DLC可以作为芯片的铜片散热器的绝缘电阻，散热器的铜瓣后端与芯片相连，首先镀层镍，然后是无定形氢化硅，最后是DLC层，该膜能防止通常功率下线胀系数不匹配而引起的铜片抓痕。

将类金刚石膜应用到电路制造及电子器件上：①类金刚石在超大规模集成电路（ULSI）芯片的制造上可以发挥其潜在优势，将类金刚石膜用作光刻电路板的掩模，不仅可以防止在操作中反复接触造成的表面机械损伤，而且还允许用较激烈的机械或化学腐蚀方法去除膜表面污染物而不形成对膜表面本身的破坏。②由于DLC和FDLC有低的介电常数K，因此引起了科研工作者的研究兴趣。ULSI超大规模集成电路BEOL（线后端）互联结构需要低K值的材料来改善其属性。通过调整其沉积条件，可获得介电常数在2.7~3.8的DLC膜和$K<2.8$的FDLC膜。对于BEOL互联结构，低K值的DLC膜是很好的选择。③采用碳膜和类金刚石膜交替出现的多层结构可构造具有共振隧道效应的多量子阱结构，具有独特的电特性，已被应用于微电子器件上。

将类金刚石膜用在平面发射显示上：平面板场发射显示（FED）用Mo或Si尖来发射电子激发磷荧光，这个尖需要获得高电场来发射电子，类金刚石的氢化表面有负电子亲和力和化学惰性的性质，因此类金刚石有潜力作为FED的电子发射器。因为膜中含氢，DLC膜已经被发现能增强金属尖的发射电流，氮的掺入增强了这一效果，这可能是减少了sp^3键，从而降低了门限电场。实验证明表面硬度也很强地影响DLC的场发射效果，因此有人认为：类金刚石或其他形式碳膜的场发射性不是和材料的电子亲和力相联系的，而是由膜的纳米硬度控制的。

3）光学上的应用　利用类金刚石膜的可见光吸收和红外透过性能，可以用在锗光学镜片上和硅太阳能电池上作为减反射膜，这种膜有很高的电阻率、化学耐腐性和抗磨损性。①由于类金刚石膜具有极高的红外透过率，因此可以采用类金刚石膜作为Ge、ZnS和ZnSe等基片上的减反射膜。国外有人制备了某些这样的膜层，样品显示了很好的红外属性，虽然易脱落，但是随着大量实验和过渡层的发展，已经应用到工业上。②对于任何一个高效的光热转换过程必须有很大的太阳辐射吸收能力和很小的热损失，几种可供选择的膜（用硅、锗或类金刚石）沉积到抛光后的金属基体已被提出。通过实验比较，单层类金刚石膜有最好的光热转换效率。

由于类金刚石膜具有良好的光学透过性和适于在低温沉积的特点，因此类金刚石可以作为由塑料和聚碳酸酯等低熔点材料组成的光学透镜表面抗磨损保护层。类金刚石光学隙带范围宽，室温下光致发光和电致发光率都很高，有可能在整个可见光范围发光，这些特点都使得类金刚石膜成为性能极佳的发光材料之一。

4）医学上的应用　到目前为止，碳的不同形式已被用到生物医学领域，生物组织能够很好地与注入的碳组合在一起，支持一个持久的耐用的界面，血液在碳表面形成一个蛋白质层以防止血液凝块的形成。实验表明，用做人工心脏瓣膜的不锈钢或钛合金表面沉积类金刚石膜的涂层后能同时满足力学性能、耐腐蚀性能和生物相溶性要求，从而提高了这些部件的使用性能。由于类金刚石有良好的硬度和摩擦性能，被用作人工关节承受面的抗磨层。另外，用镀碳的纤维做的片状薄假体，在人体中的实验显示了很好的抗凝血性，而且碳纤维的植入能够加快组织生长，也可用于韧带修补。用镀DLC膜的矫形针在羊体中的实验表明：镀DLC膜的矫形针减少了组织的收缩和其后的感染。近来有人用镀DLC膜的矫形螺栓在人体内进行了长期的实验，结果证明了镀膜的工具没有任何腐蚀，并且被植入者没有任何不良反应。

(4) 等离子体技术对其他材料的表面改性

通过低温等离子体表面处理，材料表面发生多种的物理、化学变化，或产生刻蚀而粗糙，或形成致密的交联层，或引入含氧极性基团，使亲水性、粘结性、可染色性、生物相容性及电性能分别得到改善。

用几种常用的等离子体对硅橡胶进行表面处理，结果表明N_2、Ar、O_2、CH_4-O_2及$Ar-CH_4-O_2$等离子体均能改善硅橡胶的亲水性，其中CH_4-O_2和$Ar-CH_4-O_2$的效果更佳，且不随时间发生退化。英国派克制笔公司将等离子体技术用于控制墨水流量塑料元件的改性工艺中，提高了塑料的润湿率。

用低温等离子体在适宜的工艺条件下处理PE、PP、PVF_2、LDPE等材料，材料的表面形态发生的显著变化，引入了多种含氧基团，使表面由非极性、难粘性转为有一定极性、易粘性和亲水性，有利于粘结、涂覆和印刷。

塑料、橡胶、纤维等高分子材料在成形过程中加入的增塑剂、引发剂及残留单体和降解物等低分子物质很容易析出而汇集于材料表面，形成无定形层，使润湿性等性能变差。尤其对医用材料，低分子物渗出会影响到生物机体的正常功能。低温等离子体技术可在高分子材料表面形成交联层，成为低分子物渗出的屏障。

有的研究人员采用不同等离子体改性PI、PET、PP薄膜，发现经处理的薄膜表面电阻降低了2~4个数量级，材料的介电损耗和介电常数也发生了变化。将该技术运用于微电子技术领域，可使电子元件的连接线路体积大为缩小，运行可靠性明显提高。

以等离子体接枝聚合进行材料表面改性，接枝层同表面分子以共价键结合，可获得优良、耐久的改性效果。美国有人曾将聚酯纤维进行辉光放电等离子体处理与丙烯酸接枝聚合，改性后纤维吸水性大幅度提高，同时抗静电性能也有改善。国内某些学者用Ar等离子体处理尼龙绸表面，引入丙烯酸，接枝聚合使尼龙绸抗静电性增强。低温等离子体接枝改性毛织物原料及成品，可改善毛绒表面性能、增强着色性、软化织物、降低缩水率，且毛织物本体不受影响。涤纶纤维坚固耐穿，但其结构紧密、吸水性差、难染色，有人用低温氮等离子体引发丙烯酰胺对涤纶织物进行接枝改性，接枝后涤纶织物的上染百分率、染色深度及亲水性都有明显提高。

低温等离子体对医用材料表面处理，可引入氨基、羰基等基团，生物活性物质与这些基团接枝反应可固定于材料表面。用等离子体处理聚丙烯膜，引入氨基，再通过共价键接枝，固定上葡萄糖氧化酶，经测定，接枝率分别达52 $\mu g/cm^2$和34 $\mu g/cm^2$。

高气压非平衡等离子体与大气压非平衡等离子体能用于产生某些很有用的化学反应，如生产臭氧用于水的消毒，处理烟气中的污染成分，也可用于处理天然纤维的表面以获得改进的性能。上海纺织科学研究院与复旦大学研制了介质阻挡放电（DBD）等离子体处理羊毛的工艺和设备。研究表明，纤维表面上产生了微坑，使摩擦力增加20%，改进了亲水性、抗静电性与染色性，使羊毛等级得到显著提高。

3.2 等离子体注入与沉积技术

3.2.1 几种沉积技术简介

用低温等离子体沉积技术制备薄膜，包括物理气相沉积

(PVD)和化学气相沉积(CVD)两种方法。物理气相沉积指低气压等离子体源产生含有多种活性粒子的等离子体，在通过某种物理过程如物质的蒸发或在受到离子束轰击时物质表面原子的溅射现象，使这些粒子相互间与基体反应生成各种特性结构或功能薄膜，它包括反应蒸发法、等离子增强溅射、离子镀、离化原子团沉积等方法。等离子体化学气相沉积是利用气态的先驱反应物，通过某种放电机制产生等离子体，再通过离子、原子、分子间的化学反应的途径生成固态薄膜。主要装置有直流辉光放电化学气相沉积、射频化学气相沉积、电子回旋共振化学气相沉积等。表 5.3-2 给出了几种沉积技术的对比。

表 5.3-2　几种沉积技术对比

工艺名称		装置简图	基本原理、系统组成	工艺特点
物理气相沉积	离子束沉积(IBD)	加速栅 阳极 基体 灯丝	一般采用氩等离子体通过溅射固体靶材形成大量离子，并通过电磁场加速使靶材离子沉积于基体表面形成薄膜	多采用考夫曼离子源，束流强度约几个毫安/平方厘米（相当于几个原子层/秒的沉积速率），且具有很好的能量一致性
	射频溅射沉积	射频电源 靶 磁场线圈 基体	利用射频振荡激发的氩离子轰击固体靶材，形成溅射靶材原子（或离子）和活性基团，在基体（一般接偏压）材料表面上沉积出薄膜	可适用于各种金属和非金属靶材，主要原因是射频放电会在靶材上产生自偏压效应
	磁控溅射沉积	基体 等离子体 靶 N S N	在阴极加一磁场以约束粒子运动，延长电子在等离子体中的运动轨迹，提高其参与碰撞和电离过程的概率，同时在磁场的约束下靶材受到粒子轰击次数提高，并且还将产生二次电子	设备简单，工作气体压力较低，磁控溅射可以显著提高溅射的效率和沉积速率
	磁过滤阴极弧沉积(FCVA)	阳极 绝缘体 挡板 阴极 腔体磁场线圈 磁场线圈 腔体	主要由等离子体产生部分和大颗粒粒子过滤部分组成。等离子体产生部分包括阴极、阳极和触发极，在适当的气压下触发极上的负高压脉冲将引燃阴极、阳极两极之间的弧光放电而产生靶材成分的等离子体。过滤器的作用是通过加电场和磁场过滤掉等离子体中的大颗粒粒子	磁过滤阴极弧沉积的特点是操作方便、沉积速率快，但易造成薄膜污染
	脉冲激光沉积(PLD)	反射镜 激光器 聚焦镜 旋转样品台 旋转靶	脉冲激光束通过聚焦引入沉积腔后投射在旋转的靶材上，在高能量密度的激光作用下形成激光等离子体放电，靶材成分在基体上凝结即可得到涂层	这种方法优点是：沉积速率高，可以获得表面光滑、硬度很高的薄膜。但也存在薄膜沉积过程耗能高，薄膜沉积面积小的缺点

续表 5.3-2

工艺名称		装置简图	基本原理、系统组成	工艺特点
化学气相沉积	射频化学气相沉积	气体 阳极 基体 阴极 RF	主要有感应圈式和平行板电容耦合式两种形成方式，其原理为： 感应圈或平行板电极接上射频电源，低压工作气体发生辉光放电而分解，形成等离子体即可在基体上沉积薄膜	感应圈式沉积速率较低，膜层质量较差；平行板电容耦合式可在低压下生成厚度均匀的薄膜，且生产效率高、沉积速率快、稳定性好、可调性和重复性好
	电子回旋共振化学气相沉积	波导管 调配器 环流器 微波电源 微波输入窗 磁场线圈 进气管 等离子室 引出栅 靶室	在输入的微波频率等于电子回旋频率时，电子可共振吸收微波能量，获得能量的电子与中性气体碰撞使之电离，分解工作气体产生等离子体，之后沉积到基体上去	等离子体密度高、电离度大、无电极、高活性。在等离子体镀膜、刻蚀、表面清洗等诸多领域获得了广泛的应用

总之，射频 CVD、微波 CVD、直流 CVD 法都属于等离子体激活的化学气相沉积法（PECVD），都具有比普通 CVD 更多的优点，如成膜温度低、压强小，膜层附着力大，可在不同基体上制备。近年来还出现了高沉积速率和大沉积面积的双源法，如双射频辉光放电（RF－RF）、微波－射频（MW－RF）、射频－直流辉光放电（RF－DC）。

3.2.2　离子注入技术

离子注入技术作为材料表面改性重要手段之一，越来越受到世界各国科技界及工业界的高度关注，其作用也越来越大。

（1）离子注入材料表面改性的意义

离子注入是离子经电场加速后具有足够高的能量而打入材料表面的过程。它可以在材料或工件基体性能不发生改变的情况下，使其表面发生某种性能的改变，以达到提高硬度、耐磨损、防腐蚀以及各种电、光、磁等性能的工程要求。注入技术最早源于核技术领域的加速器，早期的注入机也基本是由加速器改造而成。注入技术初期的应用主要集中在半导体加工工艺中。在该工艺中，能够赋予半导体材料特殊电特性的主要一道工序是微量掺杂。人们发现当用离子注入代替传统的热扩散掺杂工艺时，有很多令人满意的结果：离子注入可以做 1 μm 以下的浅结，特别适合于制作高频低噪声器件；离子注入形成的 PN 结陡直且无扩散，可以制造特殊结构的器件；离子注入可以较精确控制结深、杂质浓度及其分布，适宜研制新器件；离子注入可以实现不能用热扩散法进行的掺杂，即不受热力学平衡条件限制，可以注进多种元素或成分。这些因素，加之半导体材料（硅片和 GaAs 等）形状规则单一、尺寸不大等特点，促使离子注入技术在半导体行业大规模推广，取得了惊人的成果。离子注入、离子刻蚀和电子束曝光技术的结合，直接促使了超大规模集成电路的出现并飞速发展，进而促成了当今全新的电子工业、计算机工业甚至光通讯技术的全面发展的局面。近 20 年来，在微处理器和计算机的各种芯片基片的生产中，离子注入已经是半导体掺杂工艺的一种标准方法。该方法的可靠性、可控制性和重复性使得这项工艺成为半导体工业的支柱。

20 世纪 60 年代末和 70 年代初期，英国科学家开始探索离子束对非半导体材料的作用，特别是对金属的作用（Dearnaley，1969、Harthley，1976）。他们早期的努力集中于离子注入对金属材料的摩擦和显微硬度的影响，但不久就转向改善滑动磨损性能的研究，所得结果是肯定的。在大量的工业应用中，以氮离子注入技术在减少金属和碳化物工具和部件的磨损上的应用最为成功。

然而，同半导体离子注入相比，材料表面改性领域的离子注入技术的发展显得缓慢。这是由于材料表面处理的量大（以千克计，而半导体以克计），体积庞大，形状复杂。用于半导体加工的注入机由于束流强度低（μA 级）而无能为力。经过多年努力及工业实践以后，强流氮离子注入机的问世，才为该技术的推广奠定了基础，并有迅速发展之势。到 20 世纪 80 年代初期，许多精密、关键和高附加值的工具、模具和零部件的处理中都用到了离子注入技术。钛合金人工关节的延寿就是一典型例子。美国 Spire 公司等单位每年为医学界处理人造关节达 10 万只水平。美国航天飞机的低温冷凝泵阀门经离子注入处理后寿命可延长百倍，已被接受为常规的表面处理工艺。英国已将离子注入技术用于塑料模具、刀具和罐头盒成形模具的生产上。美国则更注重军事应用，航空航天用的精密轴承和飞机上的一些齿轮取得重要进展。处理的产品均已通过了严格的现场试验，延寿效果十分明显。至 80 年代末，该项技术得到迅速发展。新型强流离子源的出现，尤其是金属蒸气真空弧离子源（MEVVA）的问世，提供了几乎所有金属离子，束流强度可达几百毫安。因此，为离子注入开拓了广泛的应用前景。到 90 年代末，美国、英国、日本、丹麦、西班牙、法国等发达国家已经建立了专门的离子注入加工工厂和离子注入服务中心，形成了一定程度的产业规模。

我国一些科研单位及人员也取得了一定成果，例如对轴承件进行离子注入表面改性后，其寿命有明显提高。移动通讯电子设备（手机）应用高温超导薄膜以后，其消耗功率可降低一半，相应辐射也会大大降低。这种大面积超导薄膜在军事装备（电子战机、电子对抗系统）、空间通讯等方面都有巨大的应用潜力。离子注入可明显改善超导薄膜的性能。日本国家材料科学研究所正在研究利用离子注入技术改进此类薄膜的性能[5]。

表面工程技术的研究在国际上之所以日趋活跃，是因为

所有工程材料或零件都是通过表面与周围介质、环境、相邻偶件发生反应或相互作用，最终决定它们的使用寿命。材料的表面性能，表面强度、表面硬度、表面耐磨性、抗冲刷耐腐蚀往往是整体性能和寿命的关键。因此材料的表面性能显得尤为重要，这正是表面工程技术的活力所在。

虽然和常规表面处理技术相比，离子注入技术较为复杂，成本费用略显昂贵，但随着该技术的进一步发展，批量效率的提高潜力仍然很大。离子注入技术除本身可直接提高工具、零部件的工作性能、使用寿命之外，在节约材料和能源、减少环境污染的诸多方面还会产生更多的经济效益和社会效益。这将会大大超过离子注入处理上的付出。此外，离子注入在精细陶瓷增韧、聚合物材料表面提高硬度、导电率、光学特性上的改善效果也十分明显。

综合以上因素，离子注入和离子束技术在科学上具有重要意义，在发展各种表面优化处理技术上有着巨大潜力，在工业、农业、医疗和军事上具有广阔的应用前景。

(2) 离子注入技术的特点

在众多的表面改性手段中，以高能束流为能量载体的表面加工处理技术占有重要地位。离子束、电子束、激光束均可以不同的方式进行材料表面的各种改性。例如，激光冲击强化、激光软化处理、电子束辐照、电子束重熔、激光重熔等都显示了很好的应用前景。离子束表面改性与激光、电子束有很大不同，除了能量作用以外，还有物质成分的转移。同时会产生一系列复杂过程。

高能离子进入固体表面以后，先与固体中依次与其接近的原子发生碰撞并使其脱离原位。接着这些脱离原位的原子又与周围原子碰撞，形成所谓的碰撞级联。在其射程范围内，造成周围许多原子的大幅度位移，甚至导致晶格无序、类似于液态的组织。不过这一过程进行得非常迅速，在 $10^{-12} \sim 10^{-11}$ s 内即可完成。在碰撞级联的高密度区域，造成一瞬时的高温、高压区。当材料回复到平衡时，大多数原子回到正常点阵位置，但仍会留下相当一部分“冻结”的空位和填隙原子。该过程类似于在材料表面快速加热和淬火。其结果是在表面附近建立了注入元素的富集区以及一些辐射损伤。通过这一过程，原来的材料成分与所注入原子可形成一些新相、合金等组织结构。这就是离子注入表面改性的内在机制。这一过程与比较容易获得的激光脉冲相比，速度要快 100 倍。该过程发生的时间极短，目前还不能用实验方法进行观察，有不少研究人员用分子动力学方法进行了模拟研究。

由于离子注入过程的特殊性使其具备了许多其他改性手段没有的特点：

1）可根据需要获得各种各样的引出离子；

2）注入元素不受固体溶解度的限制，在常规下互不共溶的元素也可注入并形成新相及化合物；

3）注入深度和剂量可以控制；

4）与沉积技术相结合，可改善膜层性能以及与基体的结合力。

离子注入技术具有的这些特点，早已引起了半导体领域研究人员的高度重视，并迅速取代了传统的热扩渗掺杂工艺，发展了超大规模集成电路的工业应用，引起了微电子学领域的工业革命。接着离子束材料表面改性技术蓬勃兴起，并开始走出实验室。

离子注入技术本身也在不断发展着。除传统的束线注入外，近几年又出现了等离子体源离子注入或叫等离子浸没离子注入（Plasma Source Ion Implantation 或 Plasma Immersion Ion Implantation, PSII or PIII 以下称 PIII）。它是 1987 年由美国 Wisconsin 大学 J.R.Conrad 教授首先提出来的。由于束线注入的直线加工特点，使其对不规则形状及大尺寸零件的批量处理有很大局限性。因为处理这些零件时，必须进行束线的扫描及零件的多方位转动，即使如此也不易达到理想的均匀处理效果。而 PIII 的问世，为克服上述局限性提供了一条行之有效的捷径。使进行大规模离子注入及相关技术的工业应用成为可能。

等离子浸没离子注入既保留了传统束线注入（Ion Beam Implantation, IBI）的改性效果，又克服了“视线”加工效应，同时使设备很大程度上简化。是较传统的束线注入（IBI）更为新颖的离子注入表面改性技术。自其出现以后，立即受到世界各国尖端科技界的高度重视。尤其是发达国家，竞相投入相当大的人力物力开展深入研究，研制了各种各样的试验及样机装置，开展的工艺研究更是多种多样。早期主要宗旨是如何提高材料或零部件的各种表面性能。如表面硬度、耐磨损、抗腐蚀等，目前其应用正向半导体领域扩展。PIII 技术较传统的束线注入又具有以下优点：

1）系统简单，没有离子束引入、加速装置；

2）注入是全方位的，不涉及扫描问题；

3）入射离子沿电场方向加速，而金属表面电场与表面垂直，所以注入离子的角度基本是法向注入，减少了小角度入射引起的溅射问题。

(3) 国内外研究现状

1）国外现状　美国在该技术领域的研究仍属世界先进水平。除了 Wisconsin 大学是该技术的发源地之外，其他许多著名研究机构也进行了全方位注入技术研究。1992～1993 年，美国 Wisconsin Alimni 研究基地采用离子回旋共振法，使用来注入的等离子体得到净化，提高了注入成分的纯度，为该技术（PSII）在半导体领域的应用奠定了基础。著名的 Los Alomos 国家实验室与 Wisconsin－Madison 大学合作，研制成 ϕ1.5 m×4.6 m 的大型 PSII 设备，并首次对工业应用 PSII 技术的商业成本进行了评估。初步估算，当批处理面积达到 10^4 m^2/a 时，处理成本可降低至低流强束线注入的 10～50 分之一：约 0.01 \$/cm^2。对 PSII 涉及的工艺试验也进行了深入研究。除 Los Alamos 外，休斯（Hughes）实验室也曾进行过工程化 PSII 的研究。J.N.Matossian 等人研制了 ϕ1.2 × 2.4 m 的真空室，利用射频等离子体源，注入电压大于 100 kV，可装进 7 000 磅的零件。

德国、日本等发达国家对该技术的研究也很深入。与美国有所不同的是，他们产生等离子体的手段多为微波等离子体，尤以微波电子回旋共振（ECR）方式为多。

除了发达国家以外，近两年一些发展中国家也在开始该技术的研究。巴西空间研究院 V·A·Spassov 等人对用脉冲形成网络方法产生了 PIII 用的高压脉冲。脉冲形成网络是产生大负载能力的脉冲电源的有效方法。

在过去近十年中，不论是 PIII 的相关设备还是文献报道均成指数递增之势，图 5.3-12。随着人们对 PIII 物理过程及工艺技术特点的认识的不断深入，PIII 技术越来越接近大规模的工业应用。

日本国家工业技术研究所研制了双极性脉冲的等离子浸没离子注入系统。该装置注入所用等离子体源不是通常事先产生的稳定等离子体源，而是在注入负脉冲到来之前，用一正脉冲激发等离子体，接下来的负脉冲起注入作用。正负脉冲间的时间间隔为 0～1 ms，脉冲时序用计算机控制。此种方法的好处是产生等离子体的正脉冲可使工件受到电子的轰击作用，因而可通过调节脉冲频率来控制工件温度。俄罗斯包曼国立技术大学（Moscow）Khvesyuk，Tsygankov 等人开发的等离子基离子注入装置也有类似的工作方式。但不是用正脉冲产生等离子体，而是用延长脉冲宽度的方法来实现既产生等离子体又进行注入的目的。这样实质上省去了等离子体源部分。因没有预先产生等离子体，注入时形成的鞘层不致太厚，即使很复杂的零件也可获得比较均匀的改性层。因

此，该方法被他们自己称为三维离子注入（3DII）。关于用电子轰击来控制（加热）工件温度的方法，J·N·Matossian 等人也做过相应研究，他们认为此法是控制工艺质量的有效途径，有助于注入原子的扩散。他们用两只等离子体开关串联形成双极性脉冲，正脉冲用来吸引电子起到表面加热的作用。

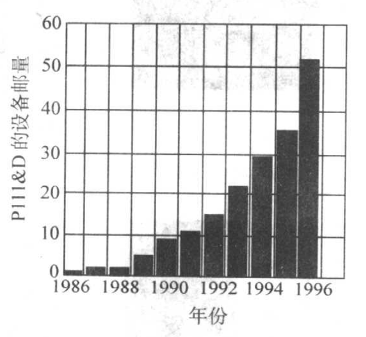


图 5.3-12 有关 PIII&D 设备（左）与文献（右）的增长

2）国内现状　我国离子注入技术开发研究始于 20 世纪 60 年代前后，当时主要集中研究束线离子注入，经多年的发展取得了不少成绩，也积累了一些教训。历史上国内曾有多家单位开展过离子注入设备与工艺的研究，虽然最后所剩无几，但为国内离子注入技术的发展作了技术储备。从 1990 年前后，开始了全方位离子注入方面的研究。但总体来说，国内由于资金力度有限，人力物力的投入较发达国家明显不足。起初 PIII 在半导体领域有很大的局限（因为成分不纯），近几年随着对器件速度的要求不断提高，人们越来越关注浅结的制造工艺，而 PIII 在低能范围注入的高效率恰恰显出了明显的优越性。这些均是在足够资金的支持下得以不断完善和发展的。

（4）发展趋势

PIII 目前的局限性在于改性层较薄，处理效率仍然偏低。针对此种现象人们对 PIII 技术又作了进一步发展，使之与某种沉积技术有机结合。于是国际上出现了等离子浸没注入及沉积技术（Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition，PIII&D），并开始显出在工业上推广之势。

PIII&D 方法的出现，把等离子体浸没离子注入与沉积成膜过程有机地结合起来，不仅克服了单纯注入改性层较薄，而且提高了一般沉积涂层的结合强度，为离子注入能量与改性剂量提供了很宽范围的工艺裕度。该方法的应用范例常有报道。图 5.3-27 为 Los Alamos 国家实验室与 General Motors 公司合作在铝制活塞头上用 PIII&D 法制取 DLC 膜的过程。一般说来沉积过程中只能靠升高基体温度来提高结合强度。如果其间有高能离子的轰击，则基体温度不致太高仍可获得良好的结合。尤其是在沉积成膜的初期，高能粒子的轰击增强作用有明显的效果。有些类似于等离子喷涂或 EB－PVD 工艺的粘接底层。

注入与沉积的结合，在材料表面改性领域增添了一种有效手段。经过几年的发展，人们逐渐认为 PIII&D 相关的物理原理与技术的发展已经度过了其初始阶段并开始推广应用。对 PIII&D 的研究随着应用范围的不断扩大仍将继续发展（尽管不一定像目前这样以指数的速度）。一些特殊领域的应用会显得更受关注。由于 PIII&D 在低能量范围注入效率很高，在半导体器件的特征尺寸日益变小且速度要求越来越高（更浅的 P－N 结）的情况下，PIII&D 在半导体上的应用还将继续增加。美国半导体工业协会（SIA）已将 PIII 作为最有前途的等离子掺杂工艺方法列入其发展规划。

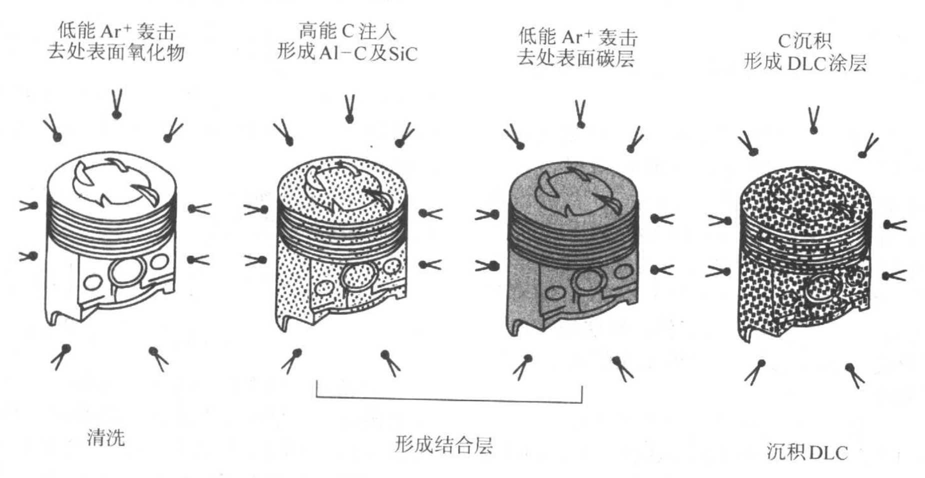


图 5.3-13 用 PIII&D 法制取 DLC 膜的过程

虽然 PIII&D 不会也不可能完全取代传统的束线注入，但它代表了一种技术的互补性，尤其适用于二维或三维物件进行大剂量注入以及离子能量偏低或适中（≤100 keV）的情况。表 5.3-3 总结了 PIII&D 的优点与局限性。

此外，脉冲调制器及工艺控制自动化的发展将会继续降低成本、提高质量。高质量的脉冲调制器会使注入离子能量更具单色性。诸如此类因素均将促使 PIII&D 在表面工程技术中占有一席之地并将逐渐由 R&D 阶段走向工业（商业）化。

3.2.3 等离子体浸没离子注入的基本原理

图 5.3-14 直观地表示了等离子体浸没离子注入（PIII）的基本原理。它不像束线注入那样由离子源中加速、引出离子束，经偏转系统对工件进行扫描实现注入，而是将工件直接置于真空室的等离子体中，然后对工件施加负高压脉冲，等离子体中的正离子被负高压加速，从四面八方全方位对工

件进行注入，省去了束线引出及扫描系统。显然，由于工件浸没于等离子体中，整个 PIII 过程本质与等离子体的鞘层行为密切相关。等离子体鞘层的动态行为极其复杂，对其处理的理论模型较多。目前一般认为两电极之间的电流与其间电位差之间的关系遵循查尔德定律

表 5.3-3　PIII&D 与束线注入相比的优点与局限性

PIII&D 的优点	PIII&D 的局限性
1）无视线加工效应，可处理重、大、复杂的三维零件	1）无荷质分离系统
2）处理时间取决于表面积	2）对均匀注入要求最小特征尺寸 > 鞘层宽度
3）比普通的等离子增强化学气相沉积与半导体类传统工艺具有竞争性	3）不太均匀注入能量分布
4）低温处理工艺	4）二次电子限制注入效率并产生 X 射线（PIII 通常产生更多的 X 射线）
5）绝缘件上积累的电荷可被等离子体中和	5）实际注入电压不能太高
6）可容易的实现注入与沉积的结合	6）现场剂量监控困难
7）低能范围（~1~10 keV）时等离子束通量大 MOS 器件性能好	7）利用金属弧等离子体源时三维工艺的优越性有所损失

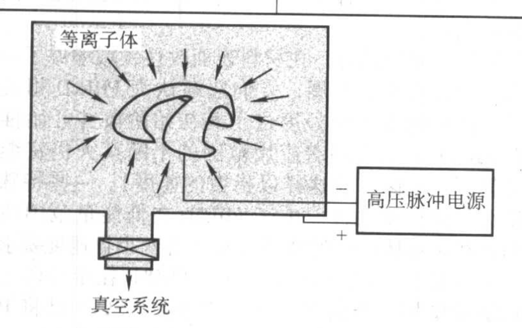


图 5.3-14　等离子体浸没离子注入原理

$$j_0 = \frac{4\varepsilon_0}{9}\left(\frac{2e}{M}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{V_0^{\frac{3}{2}}}{s^2} \tag{5.3-22}$$

式中，j_0 为电流密度，A/m²；V_0 为电压；M 为离子质量；s 为鞘层位置；m。

以式（5.3-16）为基础，可以推导出在 $t=0$ 时刻（该时刻施加负高压 V_0）以后，鞘层向空间的演化情况。如图 5.3-15 所示，为简单起见考虑平面情况。设有一工件浸没在密度为 n_0 的均匀等离子体中，在 $t=0$ 时刻，幅度为 $-V_0$ 的高压脉冲加到工件上，等离子体中的电子迅速被排斥形成离子点阵鞘层，其边缘位于 $x=s_0$ 处（图 5.3-15b）。随着时间的推移（图 5.3-15c，d），离子被注进工件，鞘层边缘向外推延，在工件附近形成了非均匀的、随时间变化的离子密度。

该模型中作了如下假定。

1）离子流是无碰撞的（在足够低气压下成立）。

2）电子具有零质量，因此对施加电压的响应无时间延迟。因为注入的特性时间远远超过了 ω_{pe}^{-1} 的时间尺度，该假设应是允许的。

3）在 $t=0$ 时刻，即施加满电压幅度 $-V_0$（相当上升时间为 0）并且 $V_0 \gg T_e$，从而有 $\lambda_{De} \ll s_0$，在 s 处的鞘层边缘也是瞬时建立的。

4）准静态离子点阵鞘层瞬时形成。该鞘层需要的电流由查尔德定律描述，并由在移动的鞘层边缘处暴露的离子提供。

5）离子通过鞘层的时间为 0，亦即注入电子流于扩展的鞘层暴露出来的电荷。

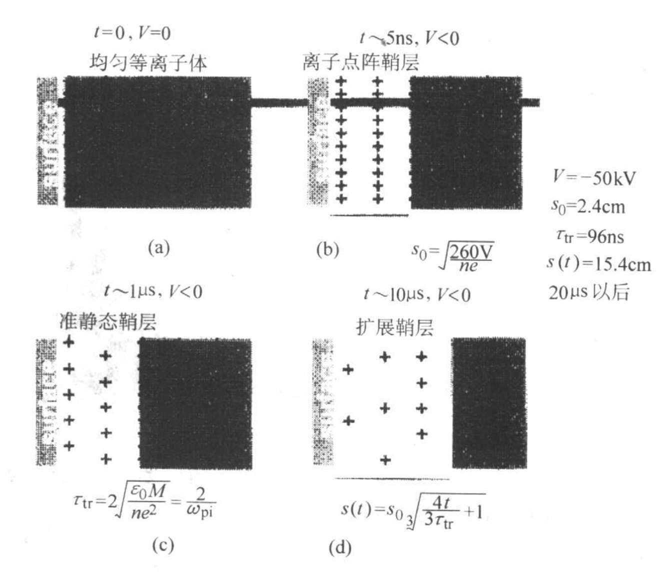


图 5.3-15　高压鞘层演化示意图

6）离子是单电荷的。

由式（5.3-22），电压 V_0 通过厚鞘层 s 产生的查尔德定律的电流密度 j_c 为：

$$j_c = \frac{4}{9}\varepsilon_0\left(\frac{2e}{M}\right)^{½}\frac{V_0^{\frac{3}{2}}}{s^2}$$

令 j_c 等于单位时间内穿过鞘层边缘的电荷 $en_0\,ds/dt$，可得鞘层边缘的扩展速度（"鞘层速度"）：

$$\frac{ds}{dt} = \frac{2}{9}\times\frac{s_0^{\,2}u_0}{s^2} \tag{5.3-23}$$

此外用到了：

离子点阵鞘层　$$s_0 = \left(\frac{2\varepsilon_0 V_0}{en_0}\right)^{½} \tag{5.3-24}$$

离子的特性速率　$$u_0 = \left(\frac{2eV_0}{M}\right)^{½} \tag{5.3-25}$$

值得注意的是鞘层速度在施加高电压及低密度等离子体中可以超过声速。对式（5.3-23）积分可得鞘层位置：

$$s = s_0\left(1+\frac{2}{3}\frac{u_0}{s_0}t\right)^{\frac{1}{3}} = s_0\left(1+\frac{2}{3}\omega_{pi}t\right)^{\frac{1}{3}} \tag{5.3-26}$$

式中，$\omega_{pi} = (e^2 n_0/\varepsilon_0 M)^{½} = u_0/s_0$ 为离子等离子频率。若采用当量单位，可使式（5.3-22），式（5.3-26）成为更简洁的形式：

令 $J = j/(en_0u_0)$，$S = s/s_0$，$T = \omega_{pi}t$ 则式（5.3-22）、式（5.3-26）可表示为：

$$J(T) = \frac{2}{9}\times\frac{1}{S^2} = \frac{2}{9}\left(1+\frac{2}{3}T\right)^{-\frac{2}{3}} \tag{5.3-27}$$

$$S(T) = \left(1+\frac{2}{3}T\right)^{⅓} \tag{5.3-28}$$

上述关系是在假设离子是由移动的鞘层提供的。该假设对较高电压、低密度等离子体的情况下是正确的。对高密度等离子体，鞘层可能是亚声速，这种情况下需要建立预鞘层。对很长的脉冲将形成静态查尔德鞘层。此时，需要放弃移动鞘层假设并要考虑以 Bohm 速度 $u_B = (eT_e/M)^{1/2}$ 而靠近鞘层的离子的贡献。靠近离子形成的电流一定要加到由于鞘层扩展暴露出来离子电荷形成的电流中去：

$$j_c = en_0\left(\frac{ds}{dt}+u_B\right) \tag{5.3-29}$$

于是方程式（5.3-23）变为

$$\frac{ds}{dt} = \frac{2}{9}\times\frac{s_0^{\,2}u_0}{s^2} - u_B \tag{5.3-30}$$

即鞘层速度将会减缓。同时鞘层厚度、建立静态鞘层所需时间 t_c 均要相应改变。

以上就是等离子体浸没注入中涉及的基本鞘层问题。应当看到，PIII&D 的理论计算及数值模拟虽然有很多报道，但到目前为止理论的精确程度尚未达到其结果不用试验手段检验或分析的地步。这也是该工艺物理过程的复杂程度决定的。没有哪一种模型完全精确的描述注入沉积过程的各个细节。甚至是注入剂量也不容易通过计算来获得。所以大部分有实际价值或工程应用的结果仍需进行各种试验分析手段来获得。

3.2.4　等离子体浸没离子注入与沉积（PIII&D）系统的组成

要实现等离子体浸没注入 PIII，必须具备两个基本条件：获得等离子体——等离子体源；使离子获得注入所需能量——负脉冲高压电源。最后由真空室把等离子体源、高压电源、待处理工件有机地结合起来，形成一个完整的系统。等离子体源起着提供注入离子的作用。其一般要求为：能够提供密度尽可能高的等离子体。适应多种工作气体，产生的等离子体纯净，性能可靠稳定。负脉冲高压电源是注入离子能量来源。PIII&D 工艺中要求负脉冲高压电源具有输出波形规则、脉冲幅度、频率可调、负载能力大等特点。在半导体掺杂工艺中还要求电源输出尽可能规则的矩形脉冲，以保证注入能量的单色性，使掺杂深度范围窄（离散性小）。对金属材料表面改性而言，注入脉冲有一定的上升下降时间，对改性效果并无太大影响。因为在脉冲上升下降时间内，注入电压低于最高峰值，实质上相当于有低能离子注入，亦即有所谓的重叠能量注入，在一定程度上可使改性层厚度增加。当然，低能部分所占的比例不能太多，否则低能离子引起的溅射效应，将会更多地损失注入剂量。真空室是容纳工件和等离子体的必要空间，对处理工艺的工程效果有着重要作用，因此也是系统的重要部分。图 5.3-16 为一种微波 ECR 等离子体浸没离子注入及沉积系统组成示意图。

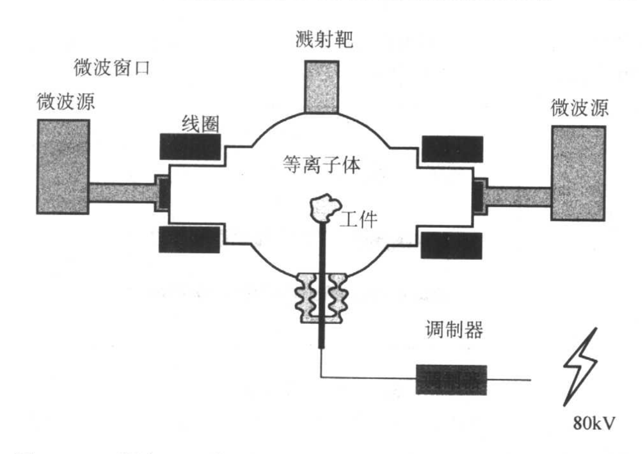


图 5.3-16　微波 ECR 等离子体浸没离子注入及沉积系统组成示意图

此处围绕一般系统中真空室、微波等离子体源、负脉冲高压电源等主要内容的总体设计思想进行介绍。

（1）真空室

一般说来设计 PIII&D 系统尤其是工业用设备，必须要综合考虑各种因素，针对应用对象，合理选取各组成部分的性能及参数，使性能及造价达到可以接受的程度。不同的应用场合，设计思想有很大不同。目前 PIII&D 的两大应用领域：耐磨损涂层及注入与半导体掺杂工艺就存在的巨大差别。没有任一种设计能适用两种应用情况。例如，对上吨重的模具进行大功率高剂量的注 N^+（100 kV，50 kW；4×10^{17} ions/cm^2）与对硅片进行 B 掺杂（5 kV，0.5 kW；4×10^{15} ions/cm^2）相比，不论从真空室体积、高压电源参数、等离子体源特点等方面都存在着很大区别。因此，PIII&D 的设计需要牵涉到真空与等离子体技术、表面与材料科学、过程控制及机械制造、特殊应用的经济分析等多方面的知识。

PIII&D 系统的设计要考虑的因素很多。与真空室设计相关因素及考虑次序可按框图 5.3-17 进行。所有设计思想要围绕最终应用目标进行。一般包括三个因素：零件类型及尺寸、处理工艺类型、生产批量。接下来真空室的设计可分为两个步骤：首先考虑与上面最终目标的三个主要因素相对应的综合特点——真空室尺寸和形状、工作电压、处理功率。尤其是待处理工件的尺寸经常用来决定真空室的大小。所要进行的工艺类型决定注入电压，功率取决于生产批量的大小。最后要详细考虑真空室结构、真空泵、卡具设计、温度控制、过程监控等因素。

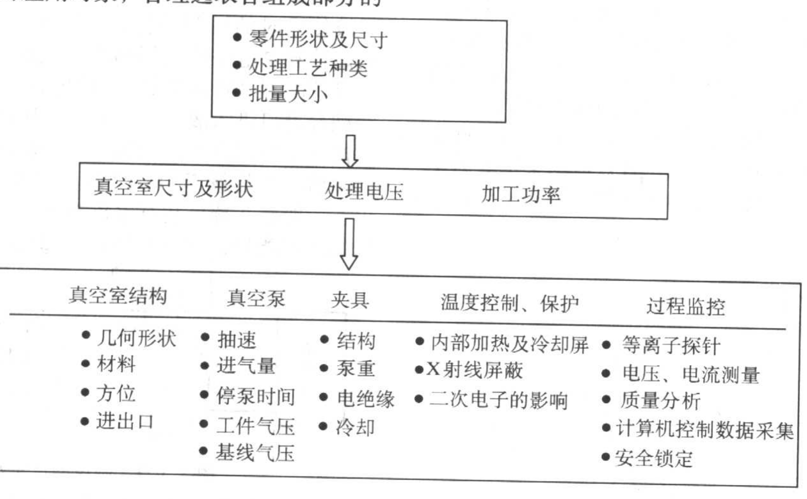


图 5.3-17　与真空室设计有关的若干因素

真空室尺寸的大小一般取决于零件尺寸 $X_{工件}$、等离子体尺寸 $X_{等离子体}$、鞘层尺寸 $X_{鞘层}$、卡具尺寸 $X_{卡具}$（图 5.3-18），即

$$X_{真空室} \geqslant X_{等离子体} + X_{工件} + X_{鞘层} + X_{卡具} \tag{5.3-31}$$

其中卡具尺寸与所加电压有关（其尺寸就是一定电压下的绝缘距离），作为粗略估算的一个原则，一般取

$$X_{卡具} \geqslant 1.5\ \mathrm{mm/kV} \times U\ (\mathrm{kV}) \tag{5.3-32}$$

鞘层尺寸由式（5.3-26）决定（在一维情况下）：

$$X_{鞘层}(t) = s = s_0\left(1 + \frac{2}{3}\omega_{pi}t\right)^{\frac{1}{3}} \tag{5.3-33}$$

$$X_0 = s_0 = \left(\frac{2\varepsilon_0 V_0}{en_0}\right)^{½} \tag{5.3-34}$$

式中，X_0 为离子点阵鞘层；ω_{pi} 为离子振荡频率；V_0 为注入电压；n_0 为等离子体密度。

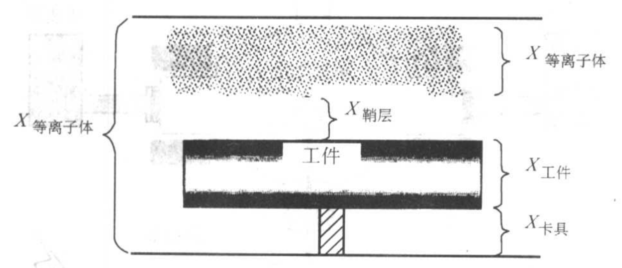


图 5.3-18 真空室

对于一般摩擦磨损应用而言，若选用 $V \approx 70$ kV，$n_0 \approx 10^9$ cm^{-3} 则有 $X_{sheath} \approx 0.3$ m。

等离子体尺寸 X_{plasma} 与工件尺寸关系不大。其范围选择要考虑在鞘层扩散其间有足够的等离子储量以提供离子流并在每一脉冲过后可添满鞘层。通常可取 0.3 m 左右。

例如对一个尺寸为 30 cm 大小的工件，真空室尺寸大约为 $X_{chamber} \geqslant 0.3+0.3+0.3+0.1 \sim 1$ m。

PIII&D 设备的真空系统除了一般真空设备具有的密封性、刚性要求以外，还有一些附加的要求。如对等离子体要有很好的约束；应尽量减少等离子体在真空室壁上的损失；内壁的真空稳定性要好（不易溅射出物质）以及具有防辐射等要求。另外要求工件易装卸，开、关真空室的等待时间越短越好等。

通常情况下，在系统设计、研制过程中，真空室除大概按上述原则进行设计以外，还要考虑到磁场分布、工程要求等综合因素，最终确定真空室尺寸及结构。而结构的刚性与所用板材厚度的选取，可参考借鉴真空技术手册上的经验或半经验公式进行的。此处对单纯机械的设计过程不作详细说明，而重点介绍与 PSII 工艺密切相关的结构特征及技术特点。

（2）等离子体的约束

在 PIII 工艺中，真空室既是工件被处理的地方，又是容纳等离子体的地方。由于等离子双极扩散的特点，在固壁附近消失很快。为了减少等离子在固壁处的损失，用于 PIII 的真空室周围（内侧或外侧）一般均布有极性相间的永磁体，形成所谓的会切磁场（cusped magnetic field），如图 5.3-19 所示。由于会切场的连续性，在真空室内侧构成了近乎封闭的磁力线，这样在真空室内形成了能够阻挡等离子体向固壁靠近的一层屏障。由于会切磁场的形成，有效地约束了等离子体。当然在会切场的各切点处仍有相当一部分等离子体在壁面上损失掉。

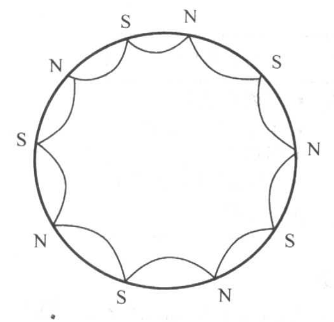


图 5.3-19 会切磁场示意图

（3）X 射线防护

在 PSII 过程中，高能粒子打进靶材，将击出多个二次电子，经过鞘层的加速，以与注入的单价离子同样高的能量打向真空室壁，导致较强的 X 射线辐射。50 kV 以上的工作电压必须采取防护措施以确保操作安全。X 射线的辐射强度为 rad/（h·mg），国内 X 射线剂量仪一般以居里或伦琴 μGy/h 为单位。X 射线的防护一般采取包铅皮的方法。铅的厚度对不同电压下 X 射线的吸收（或衰减）趋势如图 5.3-20。对注入电压为 80 ~ 90 kV 的装置，采用4 mm 的铅皮对真空室进行包裹、观察窗采用 12 mm 厚的 ZF－6 铅玻璃（相当 4.12 mm 铅）即可符合安全标准。实测结果表明，注入电压 80 kV 工作时，用 FJ－347A 型 X、γ 射线剂量仪检查接口法兰处，读数很微小，只有 0.25 μGy/h 的瞬时摆幅（2.5 μGy/h 以下为安全值），说明工作是安全的。

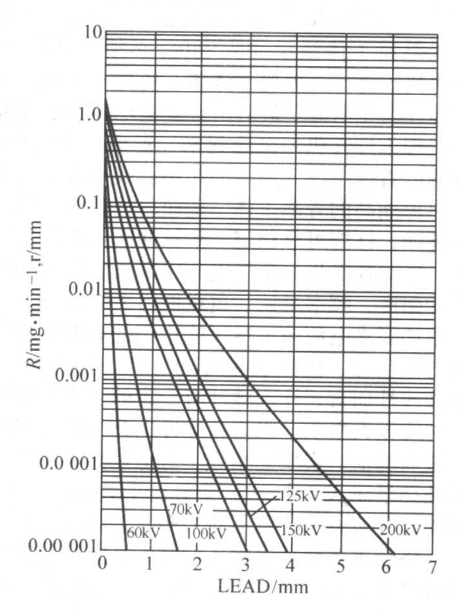


图 5.3-20 铅的厚度对不同电压下 X 射线的吸收

（4）等离子体源

以微波等离子体源为例，介绍该源在等离子体源离子注入注入中的应用。

1）微波系统　频率为 2.45 GHz 的微波，通过矩形波导，销钉调配器，耦合窗口馈入放电室。用销钉调配器调节微波传输时的匹配特性，如图 5.3-21 所示。由微波源电源向磁控管供电并使之振荡产生微波。产生的微波经环形器，销钉调配器（智能销钉），波导管等元件的传输，最后由微波耦合窗口进入放电室。其中环形器的作用是使微波通过它时按一定的行进方向传播。从 1 端输入的微波，只能从 2 端口输出。由负载返回到 2 端口的微波，只能由第 3 端口输出，一般在 3 端口装有水负载，用于吸收由于负载不匹配返回的微波能量，以便对微波源起到保护作用。

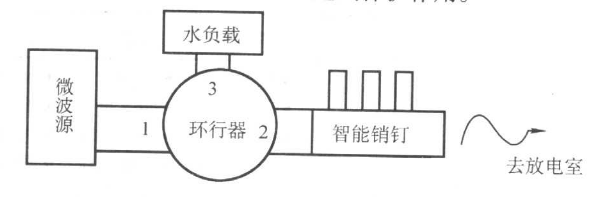


图 5.3-21 微波的产生及传输过程

2）放电室及其内径　放电室是微波等离子体源乃至整套等离子体源离子注入装置的关键部分，其尺寸及性能直接关系着加工工艺的质量与效率。这里简单介绍放电室的工作原理和等离子体的产生过程。

如图 5.3-22 所示。在微波传输方向上加上恒定磁场，磁感应强度为 B。当磁感应强度达到一定值并在合适的气压范围内［$(3 \sim 4) \times 10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa)］在放电室中就会发生微波击穿放电产生等离子体。若采用微波电子回旋共振放电方



式，可使电子充分吸收微波能量产生高密度等离子体。电子回旋共振（ECR）的原理如下。

微波传输时电场的振动方向与传输方向垂直（即交变电场与恒定磁场垂直），因此受微波场激励的电子振动方向也与所加磁场的方向垂直。电子必受一洛沦兹力 $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ 而作圆周运动。电子在磁场中作回旋运动的频率为

$$f = qB/2\pi m \tag{5.3-35}$$

式中，q 为电子（荷）所带电量，C；B 为垂直于运动方向的磁感应强度，T；m 为电子（荷）的质量，kg。

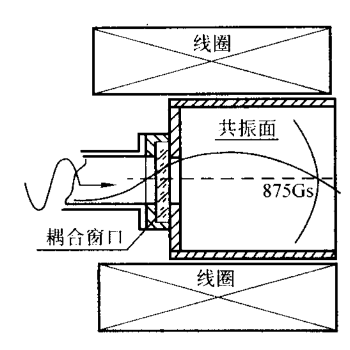


图 5.3-22 一般微波 ECR 等离子体源放电室结构

当所加磁感应强度 B 达到一定值时，电子作圆周运动的频率与微波场的频率相等，此时，电子回转一周，电场恰好振荡一次，电子的运动方向始终与加速场的方向保持一致，因此可共振吸收微波能量使其自身动能越来越大，直至与其它原子碰撞并使之电离，形成（产生）等离子体。对于工业用微波频率 2.45 GHz，欲使电子在所加磁场中作该频率下的回旋运动，将电子电量 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C，电子质量 $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg 代入式（5.3-36）（$f = 2.45$ GHz），可求出 $B = 0.087\,5$ T = 875 Gs。亦即，当所加磁场达到 875 Gs 时，可发生所谓电子回旋共振（ECR）效应而产生等离子体。这就是通常所说的在工业微波频率 $f = 2.45$ GHz 下发生电子回旋共振所需要的磁感应强度 875Gs。显然，875 Gs 的整数倍（如 1 750 Gs）亦可发生共振效应。由于电子共振吸收了微波能量，因此产生的等离子密度高。在实验中，用单探针系统测得微波 ECR 等离子体源产生的等离子体密度可到 $3 \times 10^{10}/\text{cm}^{-3}$（距放电位置约 30 cm 处）。

放电室内径尺寸的选择，是另一技术关键。根据微波传输理论，圆型腔内的微波模式的波长由贝塞尔函数 B_m 及其导数 B'_m 的根确定，如果圆型腔的半径 $R = a$，则横电波模式的截止波长为

$$(\lambda_c)\ TE_{mn} = 2\pi a / Y_{mn} \tag{5.3-36}$$

而横磁波模式的截止波长为

$$(\lambda_c)\ TM_{mn} = 2\pi a / X_{mn} \tag{5.3-37}$$

式中，X_{mn}，Y_{mn} 分别是 m 阶贝塞尔函数与其导函数的第 n 个根。因此，凡是 $\lambda < \lambda_c$ 的微波模式均能在圆型腔（或波导）内传输与存在。亦即凡是满足

$$(2\pi a/\lambda) > X_{mn} - B_m\ (X_{mn}) \tag{5.3-38}$$

$$(2\pi a/\lambda)\ \lambda Y_{mn} - B'_m\ (Y_{mn}) \tag{5.3-39}$$

的各模式的波均能通过此波导或圆型腔。因为贝塞尔函数及其导函数的各个根在数学上已精确求得，因此，可将选取的圆型腔（或波导）的半径与 2.45 GHz 微波的对应波长代入 $2\pi a/\lambda$；计算出该值并与 X_{mn}、Y_{mn} 比较，即可知存在的模式。例如，装置的谐振腔内径取为 ϕ160 mm，将半径 a = 8 cm，λ = 12.245 cm 代入 $2\pi a/\lambda$ 中，算出其值为 4.105，再与表 5.3-4 对比，即可知道，该腔中可产生有 TE_{01}，TM_{11}，TE_{21}，TM_{01}，TE_{11}，五个模式。微波模式的增多，使腔内的电磁场分布变得复杂，但等离子体形成以后，则波导内无论传输什么模式，对放电都没有不利的影响。腔截面内多模场的存在使场及功率的分布更趋于均匀，亦即有利于等离子体密度的均匀分布，容易获得大空间的等离子体。

表 5.3-4 B_m（X_{mn}），B'_m（Y_{mn}）的根与 TE_{mn}、TM_{mn} 的对应表

贝塞尔函数及其导数 B_m，B'_m	根值 X_{mn}，Y_{mn}	微波模式 TE_{mn}，TM_{mn}
J'_1	1.841	TE_{11}
J_0	2.405	TM_{01}
J'_2	3.054	TE_{21}
J'_0，J_1	3.832	TE_{01}，TM_{11}
J'_3	4.200	TE_{31}
J_2	5.135	TM_{21}
J'_4	5.300	TE_{41}
J'_1	5.330	TE_{12}
J_0	5.520	TM_{02}
J_3	6.379	TM_{31}
J'_5	6.410	TE_{51}

上述选取过程亦可反过来进行，即先初步选取几个微波模式，再算出谐振腔半径，然后考虑到真空法兰标准等因素，选取较合适的值。同时要考虑若取值过大，势必增加线圈的内径，因而导致大体积线圈及大的磁场电流。因此，要在保证较多模式的情况下，适当选取。

(5) 采用真空弯波导与专用磁路——对普通 ECR 源结构的改进

微波耦合窗口是微波 ECR 等离子体源的关键部件。它起着隔离真空及引入微波的双重作用。一般用石英玻璃、低损耗陶瓷板等制作。耦合窗口的工作条件比较苛刻，除要经受大气的压力外，还有高能粒子的轰击，吸收微波与等离子体能量引起的温升造成的膨胀等。欲使其正常工作，必须采取一些措施改善其工作环境。主要是把它放在合适的位置，使其处于磁镜的峰值磁场以外，这样即可利用峰值磁场形成的势垒，挡住大部分高能粒子，使其免遭轰击。然而，由于普通 ECR 源（图 5.3-22）耦合窗口直对真空室这一结构上的致命弱点，使得那些不受磁场约束的中性金属原子以及可越过磁场势垒的高能粒子均可沉积或轰击到窗口表面，形成金属涂层或薄膜而影响微波的传输直至阻断微波的传输。试验中发现，在对工件进行沉积涂层的工艺中，大约 3~4 h 后，直对真空室的窗口即可沉积相当厚的涂层并阻断微波，从而使工艺终止。因此为使该源能长期稳定工作满足工程上的要求，必须对其进行改进。

针对以上情况，为防止耦合窗口沉积金属涂层、免受高能粒子的轰击，北京航空制造工程研究所高能束流重点实验室对 ECR 源的关键部位进行了很大改进。采用真空弯波导加专用铁心磁路（由铁心端盖、铁心、导磁条组成）的技术手段，使上述问题得以解决。窗口工作时间由几小时提高到可长期连续工作，微波石英窗口得到了很好的保护。同时由于采用了专用铁心和磁路，线圈工作电流可显著降低，线圈的发热随之减小。

(6) 可升降式溅射靶

为了有效地进行等离子浸没注入与沉积的结合，制取各种涂层，必须通过一定手段来提供某种金属成分。采用磁控溅射方法来获得金属元素在离子注入与沉积工艺中是一种比

较好的方法。试验上发现，被处理工件到靶面的距离对涂层沉积速率是一敏感参数。因此，为了方便准确地调整溅射靶的工作距离，摸索、优化工艺参数，可专门设计带动密封、可升降式的运动机构，使溅射靶面在≤15 cm的范围内可随时连续调节，以满足各种工艺要求。

（7）温度测量

在离子注入表面改性工艺中，处理温度对一些材料非常重要。当温度超过某一临界值时可能会引起材料整体性能的改变，这当然是不希望的。而有时为了增加改性层厚度，提高原子扩散程度，又可在一定幅度内升高温度。因此对零件温度的实时监测非常必要。但被注入工件带有高压，用连结热电偶等常规方法无法进行测量，因为注入高压会打坏仪表及引起安全问题。因此，采用非接触式的红外测温可解决了这一难题。红外测温仪一般都有某一选定波长范围（谱段）。故所安真空室窗口的透光范围要与红外测温仪的感光范围保持一致，否则只能测得窗口介质本身的温度而测不到实际工件的温度。对于测量波长范围为8～14 μm的红外测温仪，可用透该波段的窗口与之相配，测量结果以mV输出（1 mV对应1℃）。

可升降式溅射靶与红外测温系统的配置使设备向工程化方向又靠近一步。图5.3-23为北京航空制造工程研究所研制的微波ECR等离子体源离子注入装置实例照片。

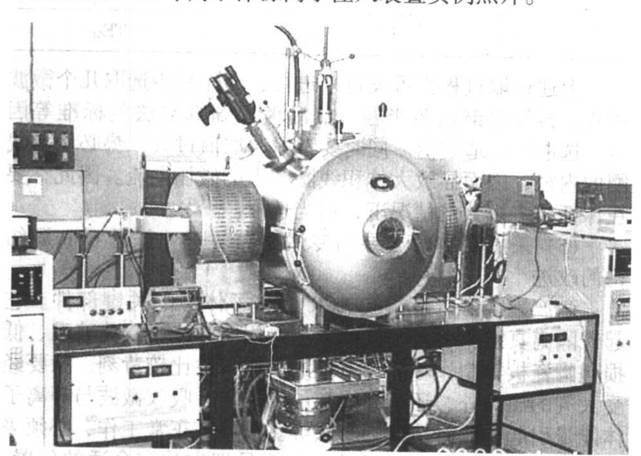


图5.3-23 北京航空制造工程研究所研制的微波ECR等离子体源离子注入装置实例

（8）负脉冲高压电源

高压脉冲发生器或脉冲调制器是等离子浸没离子注入及沉积系统的另一重要组成部分（另两部分真空室与等离子体源前面已述）。负高压脉冲是离子注入过程的能量来源，其脉冲幅度决定着注入粒子的能量，其功率大小决定着可处理工件的尺寸（对应峰值电流）及生产效率的高低。

高压脉冲电源由高压电源、储能器件、高压开关器件及脉冲变压器等部分组成。涉及到的技术参数有脉冲电压幅度、脉冲电流、脉冲宽度、重复频率等。

1）有关负脉冲高压电源简介　根据所选开关器件的种类及所配电路不同，目前有多种类型的脉冲高压电源用于PIII&D系统。（按报告）随着电子技术的不断发展有多种高压开关器件可供选择。可用于负脉冲高压电源的有：刚性真空三极或四极管，俗称"刚管"（Hard Tube），闸流管，固体开关器件等。由"刚管"组成的脉冲发生器通常称为"刚性调制器"。此类调制器的优点是：

① 具有好的平项度；
② 低电流时波形好；
③ 具有较好的起弧保护特性。

其不足为：

① 管子可选范围有限；
② 峰值电流通常较低；
③ 成本较高。

由于管子的关断特性好，故所得波形规则。适合于小型零件、非保形注入。

现在用的较多的是闸流管与脉冲形成网络（Pulse Forming Network，PFN）的组合调制。所用闸流管（Thyratrons）是内部充有氢或氘的等离子体开关。该类器件虽无关断能力，但具有很高的峰值电流，与脉冲形成网络配合使用，组成的电路经久耐用、成本较低，故经常被人们采用。由图5.3-24可以看出，闸流管/脉冲形成网络＋脉冲变压器调制其伏安特性具有很宽的输出范围。

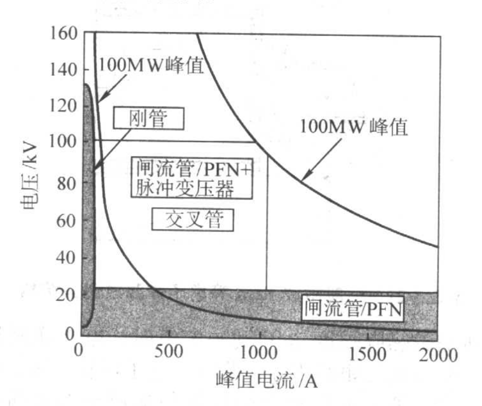


图5.3-24 各种调制器的输出电压与峰值电流

还有一种开关器件就是大功率固态开关电路（器件）（Solid－state modulators）。此类器件是现代半导体微电子技术发展的产物。用固态开关器件组成的调制电路可提供非常高的开关速度（几百纳秒），低能耗以及前述的其他类型调制器的所有优点。固态调制器不需要维持功率，开通状态压降很低，因此耗能小。可产生非常规律的脉冲波形。多个器件并联使用，也可通过大的流强。其不足为成本还是比较高，直流高压部分有较高的要求，因此造价昂贵，另外整个电源系统不太"皮实"，与其他类型的调制器相比略显"娇气"。尽管如此，由于其性能优越及其他一些优点（如体积小、脉宽从＜1 μm到很大连续可调等）已使其成为PIII&D中一种非常有吸引力的调制器件，并很有发展潜力。

各种调制器的性能参数如图5.3-24所示。

2）"PFN"＋氢闸流管的并联调制方案　高压负脉冲电源的基本原理是将交流电经升压整流后变为直流高压，再经调制器件（开关器件）调制成负脉冲高压。其主回路的调制方式主要有"串联调制"与"并联调制"（图5.3-25）。串、并联调制方式各有特色。串联方式电路直观，容易设计，但因为调制管两端均处于悬浮高电位故其控制电路亦处于高电位，这样在工程上带来诸多问题，即弱电部分需进行高压隔离。一般采取用绝缘柱将整个调制部分（包括低压控制部分）高高支起，并远离操作区因而调整起来有诸多不便。而并联调制因为管子阴极接地，整个控制部分可处于低电位。可直接调一些控制参数（如频率等）。最后电源的输出结果与所采取的调制方案及开关管器件的特性密切相关。在上面所举实例中，高压电源装置采用的即为并联调制方案，储能器件采用L－C网络（PFN，Pulse Forming Networks），该高压电源采用了HY－5301陶瓷金属氢闸流管。管子功率较大，导通时间极短。与理想开关器件相比，其关断特性有些拖延，对脉冲后沿有些影响。利用开关的导通与PFN网络的谐振，可振荡出脉冲波形，再由脉冲变压器将高压脉冲加至被处理工件。图5.3-26表示了一种PFN网络与闸流管组成



的高压脉冲调制器原理图。

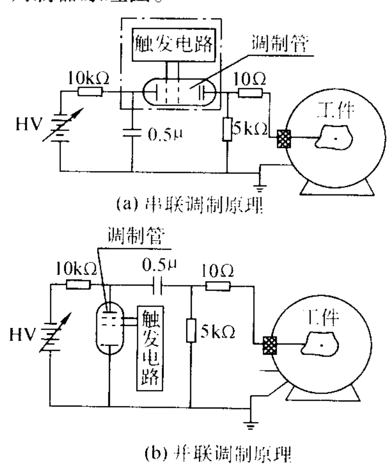


图 5.3-25　高压电源主回路调制原理图

理论上讲 PFN 网络振荡的脉冲宽度为 $\tau=2\sum\sqrt{L_iC_i}$，L_i 为各电感值，C_i 为电容值。脉冲的重复频率由触发电路来确定。在实际系统设计中，应根据具体技术指标要求，确定脉冲宽度 τ，重复频率 f。然后参考上式选择不同的 L、C 及相应的触发电路。一般可采用“555”脉冲发生器来产生初始触发脉冲。

图 5.3-26 所示的电路中，三相市电经调压器调节给主变压器，升压后由高压全波桥式整流、滤波，再经（充电）限流电阻 R_1 给储能元件（PFN）充电。其中 R_2 为（放电）限流电阻、若无该电阻则电压无法升至很高，致使电流快速升高，达不到高电压输出的目的。另外阳极电感（位于图中 R_2 之上）的作用也非常重要，该电感起着缓冲电流的作用。在脉冲前沿有一非常陡的尖峰，该尖峰幅度非常高，很容易引起相邻元件的击穿，串接阳极电感后，尖峰得以控制，但其代价是脉冲前沿变得缓慢了一些。

脉冲变压器，该部件起着将输出脉冲升幅以达到所需输出值的作用。对高峰值脉冲电压（80 ~ 100 kV 以上）直接用

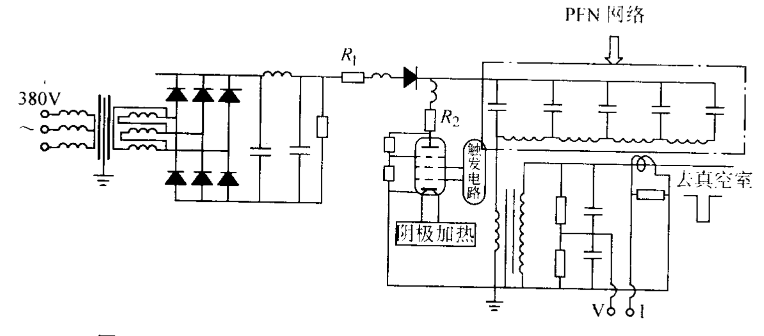


图 5.3-26　氢闸流管与 PFN 网络组成的负脉冲高压电源原理图

开关器件（如大功率 IGBT 管）的输出一般不够，因为目前开关器件的耐压值不是很高，例如美国产的 HY5301 氢闸流管的峰值电压为 70 kV，属较高类型。但仍达不到 80 kV 输出的要求。欲使使管子运行安全，一般不令其工作在峰值条件下，而是工作在较峰值为低的一数值范围。对峰值耐压 70 kV 的管子，一般令其工作在 30 ~ 50 kV 左右，在采用变压器升压。这样可延长管子的寿命。PIII 用高压脉冲电源，大多数要用到脉冲变压器，以提高脉冲幅度。但脉冲变压器的设计应与主电路有很好的匹配，否则将引起脉冲波形的畸变。

3.2.5　PIII&D 工艺的应用举例

1）35Cr2Ni4MoA 的初步注 N^+ 试验　对航空材料 35Cr2Ni4MoA，用不同的注入电压所作的初步注 N^+ 试验，其显微硬度有明显提高。表 5.3-5、表 5.3-6 为不同载荷测试的其显微硬度。

表 5.3-5　35Cr2Ni4MoA 材料经 N^+ PIII 处理前后的显微硬度（HV_{5g}）

试件号	注入沉积工艺	注入前硬度 HV_{5g}	注入后硬 HV_{5g}	硬度提高 /%
02 - 3	30 kV	541	708	31
02 - 10	45 kV	485	808	69
02 - 17	60 kV	557	759	36
02 - 22	Ti 沉积 + N^+	488	674	38

以上两组数据结果有些差别，是由硬度计载荷不同所致（注入改性层一般较浅，大载荷时可能将表面硬化层打穿）。一般来讲，载荷越小所测硬度值越靠近表面，其误差也较大。35Gr2Ni4MoA 材料调质后的硬度在 320 ~ 372HB，对应 329 ~ 377HV，故载荷为 10 g 时误差较小。

表 5.3-6　35Cr2Ni4MoA 材料经 N^+ PIII 前后的显微硬度（HV_{10g}）

试件号	注入工艺 /kV	注入前硬度 HV_{10g}	注入后硬度 HV_{10g}	注入后硬度均值	硬度提高 /%
2 - 36	50 ~ 60	422	551，581，439	524	40.8
2 - 37	50 ~ 60	372	498，467，426	464	24.7

数据表明，经 N^+ PIII 处理的 35Gr2Ni4MoA 材料，表面硬度提高 20% ~ 60%。

2）摩擦磨损试验　对大量试样进行了磨损对比试验表明，单纯的注入试验对提高磨损能力的效果是有限的。而采用“沉积 + 注入”工艺对提高磨损能力有较好效果。

在不同注入电压下（30 ~ 60 kV），35Gr2Ni4MoA 材料注 N^+ 在磨损初期摩擦系数较低（0.6 ~ 0.76），但迅速上升到接近基体的摩擦系数（0.8 ~ 0.9）。这是由于注入层较薄被磨穿的缘故。而“沉积 + 注入”层因为比单纯的注入有较厚的改性层，故对提高磨损能效果较好（见表 5.3-7）。表 5.3-7 数据中，f_{1n} 为注入层的摩擦系数；f_{2n} 指注入层磨穿后，注入层与基体材料的混合摩擦系数；ΔW 为磨损失重量。试验中上试样为所做试件，下试件为滚珠轴承钢。

由以上数据看出注入试样的摩擦系数大约降低 20% ~ 30%，少数试样的磨损量比未注入试样有明显降低（只有 0.05 ~ 0.07 mg），但大部分试样效果不十分理想。其主要原因是试样的改性层均较薄，抗磨损能力较差。因此制备有一定厚度的涂层更有实际意义。结果表明较大厚度的 TiN 涂



层，使摩擦系数大约降低 40% ~ 50%（负载 100 N 时，由 1　　降为 0.6 ~ 0.65；大大提高了抗磨损能力。

表 5.3-7　摩擦磨损试验数据

编号	注入、沉积工艺	试验Ⅰ		试验Ⅱ		ΔW/mg
		f_{11}	f_{21}	f_{12}	f_{22}	
01 - 27	未注入	1.0 ~ 1.04		0.15		
01 - 29	30 kV，80 min	0.76	0.98	0.80	1.00	0.25
01 - 14	60 kV，80 min	0.74	0.92	0.45	0.86	0.2
01 - 21	Ti 沉积 + N 注入	0.72	0.90	0.66	0.88	0.07
01 - 23	TiN 沉积 + N 注入	0.88	0.88	0.76	0.98	0.05
02 - 22	未注入	1.00 ~ 1.10				0.23
02 - 8	45 kV，80 min	0.66	0.86			0.25
02 - 15	60 kV，160 min	0.77	0.96	0.73	1.10	0.15
02 - 21	Ti 沉积 + N 注入	0.77	1.00	0.8	1.01	0.05
02 - 24	TiN 沉积 + N 注入	0.76	1.08	0.8	1.12	0.13

然而，涂层加厚带来的直接问题就是涂层容易剥落。针对工业上摩擦磨损领域的需求背景，如何开发制备具有高结合强度的较厚的耐磨功能涂层成为目前工艺研究方面的重点之一。在考虑结合强度的同时要有可以接受的沉积速率，以满足工程要求。

3）采用“脉冲与直流复合”的偏压方式改进涂层的制备工艺　涂层的结合强度与涂层的内部应力密切相关。而涂层的内部应力与其自身密度又有很大关系。密度比正常值低，一般呈拉应力，较高的密度呈压应力。密度与应力状态可定性地通过离子轰击来调节。图 5.3-27 显示了不同的轰击强度对应不同的组织结构及应力状态的示意图。不用或只用低束流离子轰击，沉积的薄膜密度比较低，在温度足够低的情况下呈气孔结构。这种结构很容易释放应力而呈微应力状态（图中 A）。随着离子轰击的加强，涂层变得致密，但涂层仍然残存一些空洞，相应地其密度稍微低于正常值，也呈拉应力（B）。进一步增加轰击强度，起增强作用的离子或碰撞原子被挤进涂层表面的大部分区域，这样在涂层连续生长过程中导致较高的密度及压应力（D），而压应力有时也是致涂层剥落的重要原因（图 5.3-28）。因此，比较理想的是采用适当的轰击强度与剂量，使涂层接近正常密度值及零应力状态（C）。当采用更高的轰击强度尤其是高能离子轰击时，扩展（延伸）的碰撞级联会再次缓解高密度区及释放内部应力（C）。这通常也认为是填隙原子含量很大时，塑性流动会附带地降低压应力。因此实时调节轰击离子的能量及束流强度，是提高涂层结合强度、控制涂层质量的有效手段。

状态	A	B	C	D	E
轰击特征	不轰击或小剂量	剂量稍有增加	轰击强度适当	轰击强度过量	高能离子轰击
结构	气孔	空洞	理想	填隙原子	理想

应力：拉应力　0　压应力

密度：ρ_0

图 5.3-27　不同离子轰击对应涂层的各种组织结构与应力状态

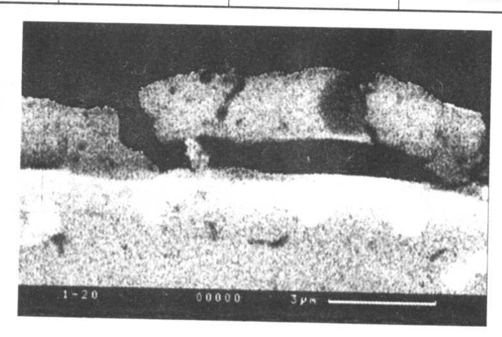


图 5.3-28　压应力引起的涂层剥落

针对此问题，如果能把负高压脉冲与直流偏压进行有机结合，实现了同一气氛、同一真空室内的复合偏压方式，则可调节涂层应力与性能。主要思想是把脉冲间歇期间的工件偏压由零电位降至沉积所需电压，亦即在脉冲间歇期间是正常的沉积工艺。考虑到 TiN 涂层与金属基体之间热膨胀系数不同，类似于等离子喷涂及 EB - PVD 工艺，可采用双层结构：底层 Ti，面层 TiN，并进行了不同工艺参数的试验。试验发现，经加高压轰击或底层用高压轰击的涂层，均有较好的抗剥落性。用划痕仪所测结合力数据以及划痕照片均说明了这一点。

4）有无高压轰击时的涂层结合力　为了检验高能离子轰击对涂层结合力的增强作用，在高速钢基体上用有、无高压轰击的不同工艺制取了 TiN 涂层。经划痕仪测量其结合情况。表 5.3-8 为一组结果。

表 5.3-8　经划痕仪测量的涂层结合情况

试样	工艺	划痕载荷/N
01 - 27	60 ~ 70 kV 清洗 20 min 注入 + 直流沉积 50 min	54，50，70
01 - 30	50 ~ 65 kV 清洗 20 min 50 ~ 65 kV 打底 3 min 直流 50 ~ 60 V 沉积 40 min	54，20，50 ~ 60
01 - 20	高压清洗 16 min 只用直流沉积约 60 min （亦未采用高压打底）	37，36，35，30

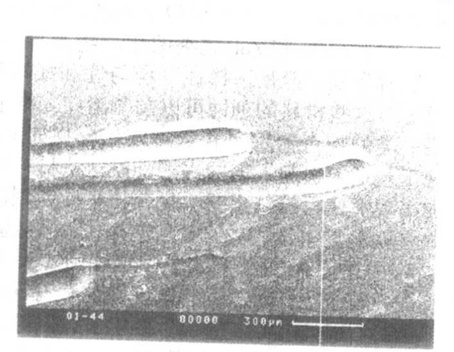
数据表明未采用高能离子轰击的涂层其划痕载荷明显偏小（说明结合力较小）。图 5.3-29 是其划痕形貌，结合较差



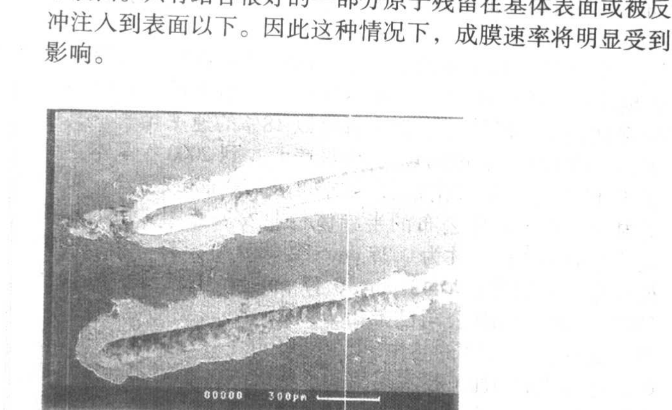
涂层的剥离面积也比较大。

5）涂层界面分析　通常采用俄歇电子分析涂层元素分布及界面过渡情况，以了解高能离子轰击的增强机制。分析表明，用高压轰击过的涂层与基体界面有良好的过渡层。在该区域涂层材料与基体材料形成了充分结合，使原有界面变得模糊。因为有原子的互相渗透，所以结合力得以增强。而这种渗透是高能离子轰击所致。故在低温下高能离子轰击起到了高温时原子扩散的效果。

6）关于沉积速率　采用高压与直流的复合偏压方式，其作用之二就是可以保持高的成膜速率（提高结合强度是其作用之一）。单纯负脉冲高压，可实现很好的动态混合注入，并在表面形成一定厚度的涂层。但由于在脉冲间歇期间，工件相当处于悬浮电位，沉积的成分基本上靠自由热运动附着在基体表面（结合较差）。当下一个脉冲到来时，由于注入离子的溅射效应，大部分结合不牢的原子又被溅射而离开原子表面。只有结合很好的一部分原子残留在基体表面或被反冲注入到表面以下。因此这种情况下，成膜速率将明显受到影响。



(a) 采用高压轰击



(b) 直接用直流沉积

图 5.3-29　划痕后涂层剥落形貌

7）国内外典型设备对比分析（表 5.3-9）PIII 技术领先国家仍属美国。威斯康辛大学（University Wisconsin—Madison）是该技术发源地，其第一代 PSII 装置大小为 $\phi350\times400$，第二代 $\phi900\times1.25$，$U_p=100$ kV，$P_{AV}=8$ kW。

Los Alamos National Lab（LANL）与 Wisconsin 等单位合作制成了 $\Phi1.5$ m×4.6 m 的大真空室，注入源达到 120 kV，$I_p=60$ A。

在工程化和商业化方面搞的最好是休斯 Hughes Research Lab 和北极星公司（North Star Research Corperation）。休斯的装置尺寸为 $\phi1.2$ m×2.4 m，可装进 7 000 磅的零件，注入电源功率达 100 kV，100 kW，调制元件用的是他们自己的专利——等离子开关，注入波形近乎方波。后来他们又尝试研制 250 kV，100 kW 的 PSII 设备，但由于专业调整，该工作未能进行。

北极星公司的设备已向外出售，其高压电源已按注入电压由低到高系列化，并明码标价，其功率最大的为 24 kW，70 kV，（88 000 $）。产生脉冲的方式有 IGBT 管，PEN 网络等。北极星公司是美国唯一专门生产 PSII 设备及相关设备的商业化公司。国内一些单位研制的设备也各有特色，下面对一些典型单位的设备做一简单比较。

国内与国际先进水平相比在技术创新及工程化方面差距还是很大的。比如关于等离子体的产生方式，美国 North Star 公司提出用脉冲 ICP 产生等离子体（间歇方式）以供 PIII 使用，这当然是有利的。还有关于脉冲宽度与注入均匀性的问题。他们提出用窄脉冲（$<5\ \mu s$）高频率获得与零件形状相似的薄鞘层，以提高注入均匀性，实现所谓的“保形注入”。这些都值得我们借鉴。

表 5.3-9　国内外单位设备简单比较

国　家	单　　位	真空室尺寸	等离子体源	电源水平
美国	威斯康森大学（University of Wisconsin.）	I $\phi350\times400$ II 约 1 m^3 III $\phi900\times1\,250$	辉光 RF	100 kV，8 kW
	劳斯阿拉莫斯（Los Alamos National Lab.）	$\phi1.5\times4.6$ m	RF	120 kV
	北极星公司（North Star）	$\phi1\times1$ m	RF	24 kW，80 kV
德国	奥格斯堡大学（Universit ät Augsburg）	$\phi400\times200+\phi600\times600$	ECR	80 kV
	乌泊特大学（University of Wuppertal）	$\phi300\times450$	ECR	100 kV，10 A
加拿大	魁北克大学（Universite du Québec）	$\phi300\times450$	ECR	小型装置 30 kV
中国	国内有关单位	$\phi300\times450\sim\phi1$ m×1.2 m	灯丝 射频 微波 ECR、	30 kV ~ 80 kV， 几千瓦 ~ 15 kW

3.3　等离子体和离子束刻蚀技术

1）等离子体刻蚀基本原理及设备　等离子体刻蚀属于干法刻蚀，它是利用放电产生的等离子体，对工件表面的绝缘薄膜和导电薄膜进行的一种加工技术。刻蚀时工件表面一般覆盖有光胶掩模，通过等离子体将掩模裸露的被刻材料去除。但是掩模本身也同样受入射粒子的轰击，也会发生物理化学反应，为了保护掩模，采用的离子能量必须使掩模材料

的溅射产额（单个离子从材料表面溅射出的离子个数）比刻蚀材料的溅射产额低，而且要保证反应活化气体粒子不与掩模发生化学反应。如果利用聚焦离子束进行扫描图形刻蚀则无需任何掩模，但设备复杂。现在多用的等离子体刻蚀设备有射频等离子体刻蚀设备、微波等离子体刻蚀设备、反应离子束刻蚀设备。它们的基本结构与制备薄膜涂层设备基本相同，只不过通入的气体不同，工作气体要与被刻薄膜材料发生化学反应。

2）等离子体刻蚀的新发展（深亚微米和纳米的等离子体刻蚀） 1997年全球半导体材料设备的市场销售额约为40多亿美元，据估计该数字每年以18%的速率增长。其中等离子体刻蚀设备的市场为24亿美元，到2000年基本达到了53亿美元。由于刻蚀尺度要求已在100 nm或更小，按照美国SIA于1994年公布的半导体行业发展蓝图，1998年商业芯片最小特征尺寸为0.25 μm，至2004年、2007年最小特征尺寸将分别降至0.13 μm、0.17 μm。据中国科学报报导（1998.2.25），IBM公司已推出了0.25 μm线宽的电脑芯片。21世纪0.1 μm线宽的芯片，已接近了硅半导体器件的物理极限，对各项微细加工技术提出了严峻挑战。在超大规模集成电路的生产中，掩模光刻和基底等离子体（反应离子）刻蚀是两个主要的工艺流程。作为重要工艺流程之一的等离子体刻蚀，0.1 μm线宽加工的综合指标要求为：大面积均匀（200～300 mm，不均匀性≤±3%），高速率单片刻蚀（2～3 min），高各向异性（侧壁垂直角≥88°），高纵横比（10:1），高刻蚀选择比（30:1），微观不均匀性小［Aspect Ratio Dependent Etching（ARDE）and Notching］，低电磁和能量损伤。

当刻蚀槽孔越来越小时，人们所遇到的问题是：①等离子体刻蚀速率随槽孔的绝对尺寸减小而下降［size－dependent etching，（SDE）］；②同一绝对尺寸的图形，刻蚀速率随图形密度增大而下降，即微负载效应［microloading effect.（ML）］，与过去普通的宏观负载效应相对应；③同一绝对尺寸下的图形，其刻蚀速率随图形深宽比增加而下降［aspect ratio dependent etching（AREC）］；④在图形和空区的刻蚀，存在局部旁刻（notching）。上述现象被称为刻蚀微观不均匀性，不同于刻蚀装置中等离子体及中性粒子参数空间不均匀性造成的刻蚀速率宏观不均匀性。其中ML的机理较为清晰且易消除，SDE在本质可归为ARDE。因而，ARDE和Notching成为近年来的研究热点。在0.1 μm线宽加工中，降低电荷能量损伤以及微观不均匀性是两个至关重要的问题。有人提出了中性束刻蚀（Neutral Beam Etching，NBE）方法，以解决上述两个问题，但面临着提高中性束流强的刻蚀面积的难题。电子束辅助刻蚀（Electron Beam Assisted Etching EBAE）可以降低能量损伤，但在电荷损伤和微观不均匀性方面还存在着缺陷。而且，NBE和EBAE在结构和技术上相对复杂。从机理上讲，导致损伤的主要原因是轰击芯片的离子具有高能部分，导致ARDE的主要原因是离子成分含有易被电场偏转的低能部分。Notching产生的原因是刻蚀绝缘槽孔中的电荷分区积累得不到中和。这些除了与等离子体产生的方法有关外，还与等离子体和芯片表面的等离子体鞘层特性的调控有关。根据已有的基础研究，上述问题可以得到较好的解决。即采用新型低气压高密度等离子体源技术，将离子流的能量适当提高，再辅之以其他刻蚀工艺技术（掩模、气体种类及组合等）条件的配合。因此等离子体刻蚀设备已是微电子工业的唯一选择。

等离子体离子源离子注入技术的发展为半导体器件的加工带来了新的希望，现在利用这种技术已制成了100 nm以下PN结，其二极管理想因子（diode ideality factor）约为1.05，体漏电流密约2 nA/cm^2，利用BF等离子体源离子注入制作了0.15～0.25 μm金属氧化物半导体场效应晶体管。

微电子领域新材料的出现，为下一个10年中等离子体刻蚀技术也提出了新的挑战。例如，铝金属导电过程中出现的电迁移效应和应力空穴效应，使得铝不能用作下一代器件的更小尺寸的要求。到21世纪初，铜将成为布线的新材料。但是，由于没有现成的系统化的理论方法供其使用，长期以来，人们一直凭借经验进行摸索“寻找合适的反应气体，合适的工艺参数（能量气压、表面温度等）以及合适的反应器，以期找到可以足够快的速率、足够高的各向异性、均匀性和选择性的刻蚀铜的工艺，为制造下一代超大规律集成电路进行技术准备。至今尚没有铜的产业化刻蚀工艺。

对于GaAs和ZnP之类的化合物半导体的刻蚀工艺已为人们所掌握，但是选择性、均匀性和损坏等问题仍未解决。通过对这些材料的刻蚀可以制备诸如二维量子线和一维量子阱一类的神奇器件。Ⅱ－Ⅵ族化合物如CdS和ZnSe等的刻蚀工艺还未引起人们的兴趣，但这些材料将随光电集成电路的出现而变得极其重要。化合物半导体刻蚀所要解决的问题之一就是防止其中的原子成分之一被选择性剥落，如在GaAs中只把As原子剥去了。这些问题要求对在载能粒子和反应性粒子轰击下表面化学变化过程有深刻的理解。

3）几种刻蚀工艺 近20年来，以等离子体刻蚀为代表的干法刻蚀技术发展速度很快。刻蚀线宽在1970年约为10 μm，现已进入亚微米级或深亚微米级，并在微电子技术、光子技术、表面科学、应用声学、材料科学和真空技术等领域获得了广泛应用。干法刻蚀大体上包括溅射刻蚀和反应刻蚀两大基本类型。

离子束溅射刻蚀（图5.3-30）又称离子铣。离子研磨或离子抛光，其工作原理是利用300～1 500 eV能量的离子束轰击工件（靶材）表面，入射粒子的动能传递给靶材原子，使靶材表面原子被溅射而达到刻蚀的目的，这是一种纯物理过程，它虽然刻蚀速率较低，但有刻蚀极限尺寸小，台阶坡度可控，各向异性好，刻蚀范围不受限制等优点，因此仍在继续受到重视并不断向前发展。

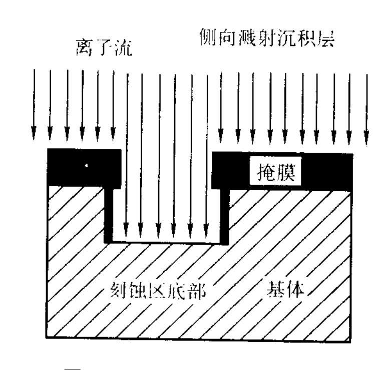


图5.3-30 离子束刻蚀示意图

反应离子束刻蚀（PIE）则集中了离子束溅射刻蚀和等离子体刻蚀的优点。它既利用了轰击离子的物理溅射，又利用了活性粒子的化学作用，使刻蚀速率比单纯等离子刻蚀或单纯的离子束溅射刻蚀快得多。因为单纯等离子体刻蚀经常导致卤烃分解引起卤素的不足，在刻蚀表面会沉积一层聚合物薄膜，使刻蚀速度显著降低。正对离子轰击的底面相对来说不会形成聚合物，不受离子正面轰击的侧面将沉积聚合物薄膜，这样刻蚀过程主要作用于底面，而侧面受到抑制，固而各向异性较好，能刻蚀线宽为微米级的图形。反应离子束刻蚀的缺点是不能独立控制子的通量、浓度及入射方向，刻蚀范围要受到一定限制。各种刻蚀方法的比较见表5.3-10。等离子干法刻蚀较湿法化学刻蚀有刻蚀速度高、不污染环境等优点，也是微米、纳米技术领域的主要加工手段。



表 5.3-10　各种刻蚀方法的比较

	化学刻蚀	等离子体刻蚀	离子束溅射刻蚀	反应离子刻蚀
刻蚀机理	化学	化学	物理	物理+化学
刻蚀极限/μm	~0.2	1.0	0.008	0.1
工作压强/Pa	—	10^2 ~ 10^3	10^{-2} ~ 10^{-3}	1
入射离子能量/eV		< 10	> 100	10 ~ 100
钻蚀（侧向腐蚀）	强	弱	无	微
刻蚀选择性	良	较好	较差	较好
刻蚀范围	有限	有限	无限	有限
刻蚀速度	快	快	较慢	较快
台阶坡度控制	不能	不能	可控	不能
刻蚀装置	简单	简单	较复杂	较复杂
玷污	较强	较弱	极微	较弱
公害	大	较小	无	较小

3.4　等离子体聚合技术

1）理论基础　低温等离子体中粒子的能量一般约为几个至几十电子伏，大于聚合物材料的结合键能（几个至十几电子伏），完全可以破裂有机大分子的化学键而形成新键；但远低于高能放射性射线，只涉及材料表面，不影响基体的性能。处于非热力学平衡状态下的低温等离子体中，电子具有较高的能量，可以断裂材料表面分子的化学键，提高粒子的化学反应活性（大于热等离子体），而中性粒子的温度接近室温，这些优点为热敏性高分子聚合物表面改性提供了适宜的条件。

2）等离子体聚合技术应用　由于等离子体聚合反应的机理，等离子体聚合物的性质常与一般聚合物不同。这类聚合物常具有高度交联的网络状结构，因而密度大，强度高，附着力好，没有浸渍镀膜中溶剂和交联剂的影响，针孔极少，厚度易于控制，耐热性和耐化学性都比较好，而且线度也很稳定，可用作材料的防护层、绝缘层、气体和液体分离膜以及激光导向膜等，应用于光学、电子学、医学等许多领域。

聚甲基丙烯酸甲酯或聚碳酸酯塑料均可制成价廉且易于加工的光学透镜，但其表面硬度太低，易产生划痕。采用有机氟或有机硅单体，通过低温等离子体聚合技术在透镜表面沉积出 10 nm 的薄层薄可改善其抗划痕性和反射指数。国外还有等离子体化学气相沉积技术应用于塑料窗用玻璃、汽车百叶窗和氖灯、卤天灯的反光镜的报道。

等离子体聚合膜具有多种性能，可使同样的基材应用于很多领域。在金属和塑料上涂类金刚石耐磨涂料的化学气相沉积技术是把含碳气体导入等离子体中，该涂层耐化学药品、无针孔、不渗透，能防止各种化学药品侵蚀基材。同样还可将减摩涂料涂于挡风玻璃雨刮器上，或将低摩涂层涂于计算机磁盘上以降低磁头磁撞。高温钇系氧化物超导材料具有很大的学术研究和应用前景，但其易受大气环境的损伤。将其暴露于水汽或潮湿的空气中，其超导性能会严重退化，甚至失去超导电性。保护高温超导体以避免大气环境对其性能的破坏已成为钇系超导体走向实用、研制超导器件的关键问题和重要环节。通过等离子体聚合技术在 YBa2Cu3O7 - δ 超导体表面制备有机硅保护膜，所制备的有机硅聚合物保护膜均匀、致密、无针孔且交联度高，有良好的耐温性能和耐蚀性能，且具有良好的稳定性。初步试验结果表明，可在水中保护 YBaCuO 超导体达 48 h 以上。

等离子聚乙烯膜沉积于硅橡胶表面后，硅橡胶对氧气的透过系数明显降低。由含氮单体制备反渗透膜，最高可阻出 98% 的食盐。生物体内的缓释药物一般采用高分子微囊，亦可采用等离子体聚合技术在微囊表面形成反渗透膜层。

等离子体聚合物膜在传感元件上的应用研究表明，放电功率等因素对膜电阻值有较大影响。用各种乙烯基单体和 Ar 辉光放电处理织物，其疏水性及染色性能在极短时间里便有改善。

国内也有这方面的研究，如四川联合大学用等离子体方法处理多种工业用聚合物，以获得改进的表面与流变特性，用于诸如工程塑料生产和制造塑料磁铁等。用等离子体处理聚氨酯表面以改进与血液的相容性。中国科学院化学研究所研究了各类有机单体在固体表面进行等离子体沉积聚合的一般规律，并进行了有机硅化合物等离子体聚合膜用作气体分离膜和金属保护膜的研究。北京大学用等离子体引发聚合反应制备了有很好血液相容性的聚合物和具有三阶非线性光学效应的苯基氰衍生聚合物。

4　等离子体喷涂技术

4.1　湍流等离子喷涂

4.1.1　概述

等离子喷涂技术是一种采用专用设备利用热源将金属或非金属粉末加热到熔化或半熔化状态，并随高速气流喷射到工件表面，形成覆盖层，以提高工件耐蚀、耐磨、耐热等性能的表面工程技术，是热喷涂技术中最重要的组成部分。等离子喷涂采用电弧放电产生等离子体作为高温热源，以喷涂粉末材料为主，可喷涂几乎所有难熔的金属和非金属，其具有喷涂效率高，涂层致密，结合强度高等优点，且基材表面的热影响区小。

等离子喷涂技术是随着现代航空工业和宇航技术的发展在 20 世纪 50 年代中期出现的，从那以后，人们对等离子喷涂技术，包括喷涂设备、喷涂工艺、喷涂材料和喷涂质保体系等，进行了不断的研究和发展，加上电子和计算机技术、自动化技术、传感器及测试技术、机器人技术、真空技术、新的涂层材料等先进技术的渗透和改进，使等离子喷涂技术取得了飞速的发展，其应用日益广泛。等离子喷涂技术已成为热喷涂技术的最重要组成部分，也是表面工程不可缺少的技术之一。目前等离子喷涂技术不仅在航空航天工业起着重要的作用，而且在其他的工业部门如电力，冶金，化工，机械，纺织，医药卫生等也得到了广泛的应用。例如，美国 P.W 公司制造的 JD8 航空发动机就有二千多个零件号的零件采用等离子喷涂工艺，美国通用汽车公司的汽车同步环喷钼自动生产线年产量达 4 千多万只，美国用于喷涂隔热涂层的 $ZrO_2 \cdot 8Y_2O_3$ 粉末每年消耗高达几百吨。据不完全统计，现在等离子喷涂技术在全世界范围内每年创造的效益为数十亿美元。

（1）等离子喷涂技术基础

等离子喷涂技术中所述的等离子体是指气体放电电弧经过压缩后形成的高温等离子体。

放电电弧通常有两种形态，即自由电弧和压缩电弧。所谓等离子弧则是指压缩电弧。等离子弧与自由电弧的区别如表 5.3-11 所示。

1）等离子的压缩效应

① 机械压缩效应　等离子弧通过等离子喷枪的喷嘴喷射出来，因此水冷紫铜喷嘴孔径的大小限制了等离子弧弧柱的直径大小。喷嘴孔径越小，孔道越长，对弧柱的压缩越

表 5.3-11　电弧形态特征

类型	特征
自由电弧	电弧燃烧不受任何约束，电弧温度一般在 5 000 ~ 6 000 K
压缩电弧	电弧燃烧由冷却喷嘴的约束作用而存在机械压缩效应、热压缩效应、自磁压缩效应。电弧温度可达 3×10^4 K

强，弧柱直径越小，这种对弧柱的压缩现象称为机械压缩效应。

② 热压缩效应　由于水冷紫铜喷嘴孔道内壁温度很低，流经喷嘴内壁附近的气体受到冷却，形成薄层冷气膜，其电离度很低，导电性差，迫使等离子弧集中流过电离度高的中心部位，电弧受到冷却气流的压缩，这种效应称为热压缩效应。

③ 自磁压缩效应　电弧电流有一定的流向，弧柱相当于一束电流方向相同的平行导体。由于平行导体间电磁力的相互作用结果，使弧柱各部分都受到指向弧柱轴线的压缩力作用，弧柱直径进一步缩小，这种现象是由于电弧自身的磁场产生的，称之为自磁压缩效应。

2）电弧等离子的组成　等离子可分为阴极和阴极区，弧柱区，阳极和阳极区三个部分，如图 5.3-31 所示。

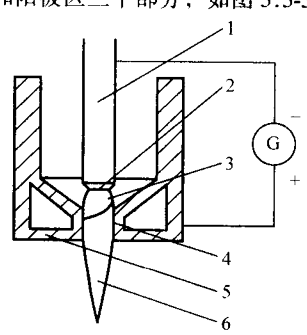


图 5.3-31　等离子弧组成部分
1—阴极；2—阴极区；3—弧柱；4—阳极区；5—阳极；6—焰流

① 阴极和阴极区。等离子放电的绝大多数电子是由阴极发出的，阴极表面放电部分的总和称为阴极斑点，其电流密度高达 $10^3\sim10^6$ A/cm^2。阴极区指靠近阴极（距阴极约 10^{-4} cm）电场强度很强的区域。由于大量电子从阴极逸出，造成阴极区内正负离子数的不平衡，形成阴极位降区，电位梯度可达 $10^5\sim10^6$ V/cm 的数量级。

② 弧柱区。弧柱区是由电弧长度上均匀分布的导电气体组成的，其电位梯度一般为 10 ~ 50 V/cm。弧柱区内正负离子浓度几乎相等，在其每个宏观区域中电离气体都呈中性，所谓等离子体即指弧柱部分。

③ 阳极和阳极区。阳极基本上仅接受弧柱区流来的电子，电子流入阳极也集中在阳极表面不大的区域，称之为阳极斑点。阳极区指靠近阳极斑点附近（约 $10^{-3}\sim10^{-4}$ cm）电场强度较高的区域，其电位梯度约为 $10^3\sim10^5$ V/cm 数量级。进入阳极区的电子带来大量的热量，使阳极温度升高。

（2）电弧等离子体的形式和特征

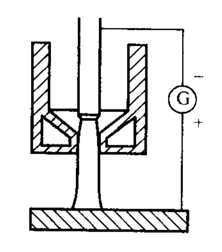
1）基本形式

① 非转移型等离子弧　简称为非转移弧（图 5.3-32a），它是在阴极和阳极（喷嘴）内表面之间形成的，而工件不带电。等离子弧在喷嘴内部不延伸出来，当连续送入的工作气体穿过电弧后，就从喷嘴中喷射出高温焰流。非转移弧常用于喷涂、表面处理以及焊接或切割较薄的金属或非金属。

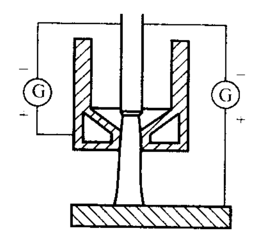
② 转移型等离子弧　简称转移弧（图 5.3-32b），它是在阴极和工件之间形成的，在引弧时要先用喷嘴接电源正极，产生小功率的非转移弧，而后工件转接正极将电弧引出去，同时喷嘴断电。转移弧有良好的压缩性，能量集中，电流密度和温度都高于同样焊枪结构同样功率的非转移弧。转移弧主要用于切割、焊接和堆焊。

③ 联合型等离子弧　由转移弧和非转移弧联合组成（图 5.3-32c），一般非转移弧作为辅助热源，起着引燃转移弧及预热金属粉末的作用；转移弧主要用来加热粉末和工件，使喷出的粉末迅速进入熔池与工件熔合。它主要用于电流在 100 A 以下的微弧等离子焊接，以提高电弧的稳定性，在进行等离子堆焊时，联合型等离子弧可以提高粉末的熔化速度，减少熔深和焊接热影响区。

(a) 非转移型等离子弧



(b) 转移型等离子弧



(c) 联合型等离子弧

图 5.3-32　等离子弧的 3 种形式

2）特性

① 温度高，能量集中　等离子最大特点之一是具有非常高的温度和能量密度，图 5.3-33 是对 400 A 非转移型等离子弧温度的测量结果（氩气流量为 10 L/min）。由图可见，在等离子中心温度最高达 32 000 K，在喷口处中心温度已达 20 000 K。表 5.3-12 为各种火焰、电弧和等离子体的温度。转移型等离子弧具有更高的温度，例如用于切割的氮气等离子弧，当电流为 700 A，电压为 250 V，喷嘴直径为 2.8 mm，气体流量为 50 L/min 时喷嘴附近最高温度可达 30 000 K。等离子弧温度高、能量集中的特点有很大的应用价值，在喷涂或焊接、堆焊时可以熔化任何金属或非金属，可以获得高的生产率，还可以减小工件变形，减少热影响区等。

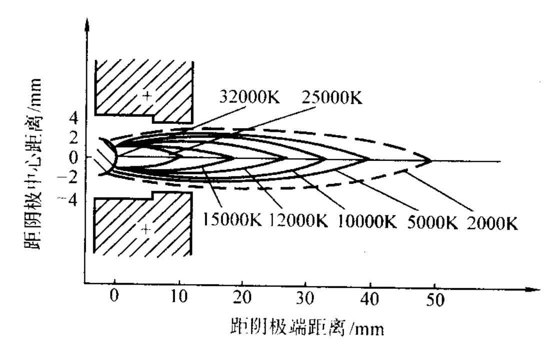


图 5.3-33　等离子温度分布图



表 5.3-12　各种火焰、电弧和等离子的温度

类型	温度/℃	类型	温度/℃
城市煤气和空气燃烧火焰	1 550	高压水等离子压缩弧	50 000
氢氧焰	2 960	氢气等离子	4 000 ~ 8 000
氧乙炔焰	3 100	氮气等离子	7 500
空气中的碳弧	4 000	氩气等离子	15 000
氩气中的碳弧	15 000 ~ 20 000	氦气等离子	20 000

② 焰流速度高　进入喷枪中的工作气体被加热到上万度高温，体积剧烈膨胀，因而等离子焰流自喷枪中高速喷出，在喷嘴附近的喷射速度可达亚音速或超音速，具有很大的冲击力，这对切割和喷涂工艺比较有利。美国研制的高能等离子喷涂装置，功率为 80 kW 时，焰流速度可达 3 马赫。

③ 稳定性好　由于等离子弧是一种压缩型电弧，弧柱挺拔、电离度高，因而电弧位置、形状以及弧电压、弧电流都比自由电弧稳定，在弧柱较长时仍能保持稳定燃烧，没有自由电弧易于飘动的缺点，不易受外界因素干扰，这对保证喷涂、焊接、堆焊、切割等的质量有重要意义。

④ 调节性好　压缩型电弧可调节因素较多，可以在很广的范围内稳定工作以满足各种电弧等离子工艺的要求，这是自由电弧所不能达到的。例如，变换工作气体的种类可以得到氧化、中性或还原气氛；改变喷嘴尺寸、控制气体流量、调节电压参数可以控制等离子弧的刚柔性，以保证在切割及喷涂时获得焰流速度高、冲击力大的刚性弧，在焊接时获得刚柔适中的等离子弧。此外，通过调节等离子喷涂设备的电功率可灵活地调节焰流温度和喷射速度，以适应不同材料的需要。

产生等离子的工作气体又称为离子气体，对工作气体的基本要求是：首先热焓和弧温高，其次要与电极和喷嘴不起化学作用，烧损最小，另外价格低廉，供应方便。常用的气体有氩气、氮气、氢气等。其中氮气属于双原子气体，具有较高的热焓值，是等离子喷涂中最常用的工作气体。氢气也属于双原子气体，在常用气体中热焓最高，热导率最大，一般在工作气体中加入少量氢气（5% ~ 10%），以提高等离子弧的工作电压、功率、温度和热焓。为改变氮气的某些性能，在氮气中加入 5% ~ 10% 的氢气做工作气体有利于提高等离子弧的工作电压和输入功率。氩气属单原子气体，在常用工作气体中热焓值最低，价格较贵。但它的引弧性能和稳弧性能比双原子气体好，还具有良好的保护性能，为提高弧压可加入适量的氢气或氮气。氦气也属单原子气体，热焓值较高，具有良好的保护作用，但是，目前国内由于来源困难成本高，很少采用。

4.1.2　等离子喷涂的基本原理和特点

（1）等离子喷涂的基本原理

等离子喷涂基本原理如图 5.3-34 所示。图的上部是等离子发生器又叫等离子喷枪，根据工艺的需要经过气管通入氮气或氩气，也可以再通入 5% ~ 10% 的氢气。由于钨极（阴极）与前枪体有一段距离，故在电源的空载电压加到喷枪上以后，并不能立即产生电弧，还需要在前枪体与后枪体之间并联一个高频电源，高频电源接通使钨极端部与前枪体之间产生火花放电，于是电弧便被引燃。进入喷枪的气体经过弧柱区时，将发生电离，成为等离子体。电弧引燃后，切断高频电路。引燃后的电弧在孔道内受到 3 种压缩效应，温度升高，喷射速度加大。由于等离子体中的正负离子处于一种电离－复合的动态过程之中，在正负离子复合的过程中会释放出大量的热量，此时往前枪体的送粉管输送粉状材料，粉末在等离子焰流中被加热到熔融状态，并高速喷打在零件表面上。当撞击零件表面时熔融状态的粉末发生塑性变形，粘附于零件表面，各粉粒之间也依靠塑性变形而互相粘结在一起，随着喷涂时间的增长，零件表面就获得了一定尺寸的喷涂层。

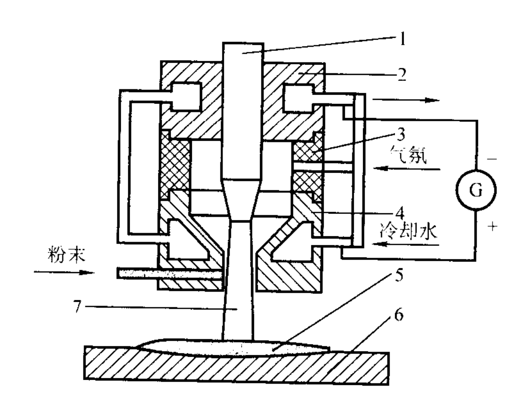


图 5.3-34　等离子喷涂原理图
1—阴极；2—阴极夹头；3—绝缘体；4—喷嘴（阳极）；5—喷涂层；6—工件；7—等离子弧焰流

（2）等离子喷涂的特点

1）零件无变形，不改变基体金属的热处理性质。由于喷涂时零件不带电，基体金属不熔化，所以尽管等离子焰流的温度较高，但若工艺得当，控制零件温升不超过 200℃，则零件不会发生变形，这对于薄壁件、细长杆以及一些精密零件的修复是十分有利的。

2）涂层的种类多。由于等离子焰流的温度高，可以将各种喷涂材料加热到熔融状态，因此可供等离子喷涂使用的材料非常广泛，从而也可以得到多种性能的涂层，如耐磨涂层、隔热涂层、抗高温氧化涂层、绝缘涂层等等。就涂层的广泛性来说，氧－乙炔火焰喷涂、电弧喷涂、高频感应喷涂和爆炸喷涂都不及等离子喷涂。

3）工艺稳定，涂层质量高。等离子喷涂的各工艺参数都可定量控制，因而工艺稳定，涂层再现性能好。在等离子喷涂中，熔融状态粒子的飞行速度可达 180 ~ 480 m/s，远比氧－乙炔火焰粉末喷涂时的粒子飞行速度 45 ~ 120 m/s 高。等离子喷涂层与基体金属的结合强度通常为 40 ~ 70 MPa，涂层孔隙率可控制在 1% ~ 10%，而氧－乙炔火焰喷涂涂层与基体金属的结合强度一般为 5 ~ 10 MPa。由于等离子喷涂时可以改换气体控制气氛，因而涂层中的氧含量或氮含量可以大大减少。

此外，等离子喷涂还和其他喷涂方法一样，具有零件尺寸不受限制，基体材质广泛，加工余量小，可喷涂强化普通基材零件表面等优点。

（3）等离子喷涂涂层结合机理

涂层的结合包括涂层与基体表面的结合和涂层内部的结合。一般所说的涂层的结合强度是指涂层与基体表面的结合力，而将涂层内部的结合力称为内聚力。一般认为涂层与基体的结合和涂层内部的结合机理为以下几种。

1）机械结合　被基体表面碰撞成扁平状并随基体表面起伏的粉末颗粒，由于和凹凸不平的表面相互嵌合而形成机械结合。一般说来，涂层与基体表面的结合以机械结合为主。

2）冶金化学结合　当基体与涂层表面相互扩散和合金



化时，两者之间形成冶金化学结合。有时会在结合面上形成金属间化合物或固熔体。

3）物理结合　物理结合是粉末粒子与基体表面以范德华力形成的结合。

（4）大气等离子喷涂设备组成

大气等离子喷涂成套设备包括电源、控制柜、喷枪、送粉器、热交换器等部分，它们相互之间的配置如图5.3-35所示。另外，等离子喷涂需要的辅助设备有：喷涂通风柜、空气压缩机、油水分离器和喷砂设备等。

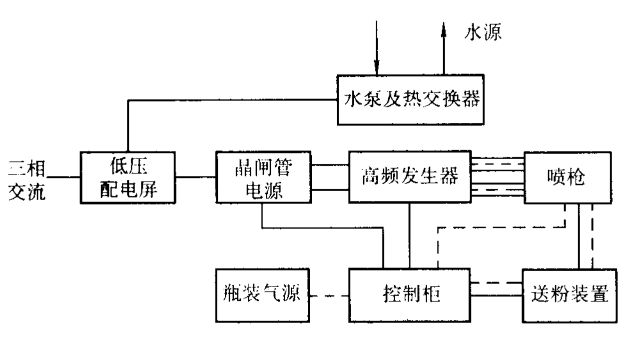


图5.3-35　等离子喷涂组成示意图

1）电源　等离子喷涂对电源的要求是：具有陡降的外特性，具备较高的空载电压，具有所需要的输出功率，具有良好的电流调节性能，输出电流受电网电压、电弧电压波动影响要小。

用于等离子喷涂的电源有三种：磁放大式硅整流电源、可控硅整流电源和逆变电源。

磁放大式硅整流电源主要由三相降压变压器、三相磁饱和电抗器、三相桥式硅整流器、输出电抗器、冷却风扇和控制电路等部分组成，具有结构简单，使用可靠，电流调节方便的优点，是目前国内等离子喷涂行业使用很广泛的一种电源。但这种电源的缺点是体积和重量较大，电流控制精度不高（一般为±5%左右），且喷枪起弧时的冲击电流较大，影响喷枪的使用寿命，目前国外已不采用。

可控硅整流电源具有起弧平稳、输出电流控制精度高（±1%以下）、耗电少、效率高、体积小、成本低等特点。和磁放大式硅整流电源相比，可控硅整流电源省去了磁饱和电抗器，节省了大量的硅钢片和铜材，因而体积和重量较小，为目前国外普遍采用。

逆变电源由于体积小（小于晶闸管整流电源）、电流控制精度高、效率高等特点，目前已经在小功率焊接电源中得到广泛的应用，并成为国内外等离子喷涂电源的一个重要的研究方向。图5.3-36为北京航空制造工程研究所研制的APS－2000型等离子喷涂设备所用的K－800可控硅整流电源组成框图。

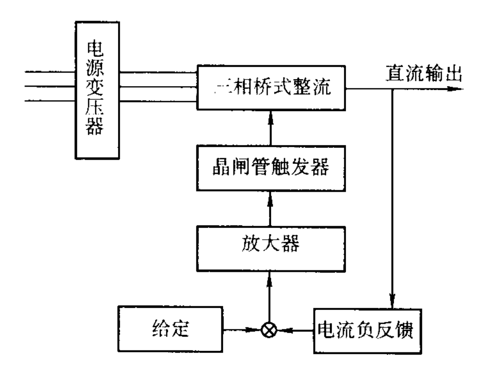


图5.3-36　K－800可控硅整流电源组成框图

该电源为工作电流可调的恒流源装置。电源输入为三相380 V，50 Hz，交流输入额定容量105 kV·A，直流输出最大输出功率80 kW，输出电压0～100 V，输出电流0～800 A，最大工作电流1 000 A，电源效率大于90%，工作方式为恒流，电流连续可调，精度优于±1%。与目前国内普遍应用的磁放大器二极管整流电源相比，K－800型可控硅整流电源具有效率高，耗能低，电流输出精度高，体积小，电源外特性好等优点。

电源的主电路采用变压器带平波电抗器的可控硅三相全波整流电路，控制电路由同步变压器，脉冲形成器，可控硅导通角控制电路，工作电流值设定电路，电流采样电路，电压采样电路，电流电压闭环反馈电路，过流过压保护电路等组成。

电源的主电路采用可控硅三相全波整流电路，可控硅工作时两只可控硅同时导通，六只可控硅交替工作。此电路整流元件上承受的反向电压较低，电流输出脉动小，变压器效率高。由于可控硅过压能力差，因此增加了阻容吸收装置及过载电压保护装置，并在主电路中串入了电抗器以使电源输出电流平稳。

电源的控制电路采用六路双脉冲触发电路，由同步变压器输出的交流电压信号来控制导通角的相位。控制电路中还设置了电流，电压给定电路，检测电路及反馈控制电路，以提高电源的电流输出精度并显示其工作状态。

主电路是指通过电弧电流的主回路，其中高频发生器有着很重要的作用。在等离子喷枪结构中，阴极和喷嘴之间有一定的间隙，电源的空载电压不可能使两极间产生非转移型电弧，必须造成两极间瞬间短路才能引弧。高频发生器的作用即是在起弧时将一高频高压电加于两极间，击穿极间介质，产生火花，引燃电弧。其电路原理图如图5.3-37所示。

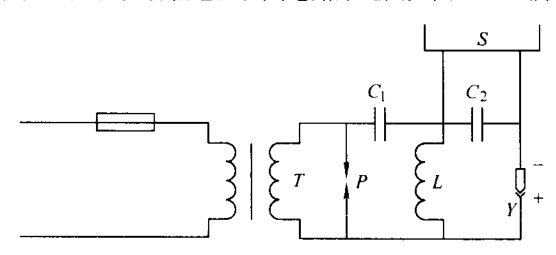


图5.3-37　高频发生器原理图

T—高频变压器；C_1、C_2—电容；L—电感；P—火花放电器；S—主电源

当主电路接通后，高频发生器接电，高频变压器T将220 V交流电压升到2 500 V，将火花放电器P击穿放电。在P击穿后，就在P－C1－L回路中产生高频振荡，振荡频率为：$f_0 = 2\pi\sqrt{\frac{1}{LC_1}}$。高频振荡线圈$L$两端的高频电势将通过电容$C_2$加到喷枪的两个电极上，使两极间产生火花，引燃等离子弧。

2）热交换器　等离子喷枪在工作时，其电功率一般为35 kW左右，阴、阳极间温度最高的地方可以达到30 000 K左右，因此，为防止喷枪烧损，就需要对其进行冷却。喷枪的冷却方式分为直接冷却和间接冷却。直接冷却即采用增压水泵将冷却水直接打入喷枪，由喷枪出来的热水直接排走。其优点是结构简单，成本低，缺点是冷却水水质差，易在喷枪内结垢，影响喷枪的使用寿命。间接冷却是采用增压水泵将冷却喷枪的蒸馏水打入喷枪，由喷枪出来的热水经冷却后再由增压水泵打入喷枪。与直接冷却相比，间接冷却可以保证冷却水水质，提高喷枪的使用寿命。

APS－2000等离子喷涂设备包含的FL－1型热交换器是



专为等离子喷涂用冷却水而设计的风冷式冷水机组，针对等离子喷涂热交换量大的特点，机组内配备了两路水系统，并配有较大容量的不锈钢水箱，增加了系统本身的蓄水量，减少了压缩机的启动频率。

FL－1型热交换器主要由压缩机，散热器，水泵，贮水箱，测温系统，管路系统，控制系统等组成，其噪声低，运行可靠，节能节水显著。

本热交换器采用两路水系统，其中：

第一路：水箱－水泵1－换热器－水箱

第二路：水箱－水泵2－喷枪－水箱

第一路为热交换器内部水循环系统，此路水压不可调，流量较大，可以保证水箱中的冷却水得到充分的热交换。第二路为热交换器外部水循环系统，用来冷却等离子喷枪，并可防止只有一路水系统时热交换器的内阻对水压的影响。此路水压可调，可以为喷枪提供有效的冷却。

贮水箱装满蒸馏水，喷枪工作时，水泵把蒸馏水以设定的压力打入喷枪管路，由喷枪回来的温水又回到水箱，由第一路水系统循环后进入换热器进行热交换，蒸馏水被冷却后返回贮水箱。热交换器的出水温度可以在3～40℃范围内任意设定，并可控制其温差在±1℃之内。

3）送粉器　送粉器是贮存喷涂粉末，并能连续而均匀地向喷枪输送粉末的装置。等离子喷涂过程能否顺利进行及涂层质量的好坏与送粉器的性能有密切关系。对送粉器的主要技术要求是送粉重复精度高、送粉量调节方便、对粉末粒度的适应范围广，此外送粉器工作时不应有漏气现象，否则容易造成粉末堵塞，影响喷涂工艺的稳定性。

喷涂用的粉末大体上分为自流态粉末和非自流态粉末，前者固态流动性好而后者差。现在常见的送粉器主要有四种：刮板式送粉器、转盘气动式送粉器、电磁震动式送粉器和鼓轮式送粉器。刮板式送粉器适用于粒度200～500目范围的各种粉末，送粉量通过更换不同孔径的漏嘴或调整漏嘴与粉盘距离以及改变粉盘转速来控制，调节比较精确，调节范围宽。转盘气动式送粉器是为输送非流态微细粉末而设计的。如Arcos公司的MU35型就属于这类。电磁震动式送粉器在贮粉料斗的壁上开有螺旋槽，当电磁震动器接通电源产生震动时，料斗中粉末沿螺旋槽向上源源不断地运动，并从位于料斗上部的出口流出，送入喷枪。电磁震动式送粉器的送粉量决定于电磁震动器的输入电压，调节输入电压能非常精确和平滑地连续改变送粉量，这样比较容易对送粉进行程序自动控制。鼓轮式送粉器中的粉末由贮粉斗经漏孔流至鼓轮上，调整好漏孔直径和距离鼓轮的间隙使得鼓轮在不转动时粉末不会自动流下，而当鼓轮一转动，粉末便随着鼓轮的转动方向流至出粉口。鼓轮式送粉器的送粉量决定于鼓轮的转速，只要调节鼓轮的转速就能精确控制送粉量，而且送粉比较均匀。其最大的优点是用于混合粉的输送，不会造成不同密度和粒度粉末的分层，减少涂层成分的偏析。

图5.3-38为北京航空制造工程研究所研制的DPSF－2型送粉器结构简图。

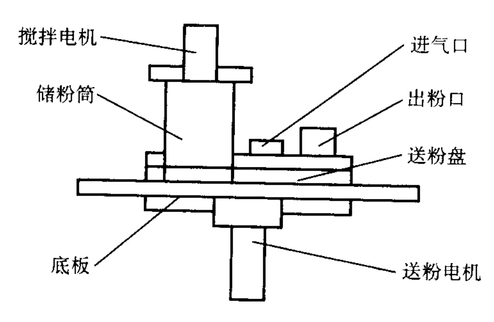


图5.3-38　DPSF－2型送粉器结构简图

DPSF－2型送粉器是靠送粉盘定量，载气输送粉末的刮板体积式送粉器。送粉重复精度为±1%，能输送粒度为20～200 μm的各种热喷涂用粉末。其送粉精度高，输送粉末范围广，送粉量连续可调。送粉器主要由壳体，储粉筒，送粉传动装置，送粉控制装置和气路系统组成。

该送粉器包括两个储粉筒，其中左边储粉筒上带有搅拌电机，搅拌电机输出轴与储粉筒中的搅拌杆相连，工作时搅拌杆以50 r/min的速度旋转，故适于输送非自流态粉末，如陶瓷粉末。右边储粉筒没有搅拌电机，适于输送自流态粉末，如金属粉末。

本送粉器的控制装置包括送粉电机调速板，电位计，数字表等。通过调节电位计可使数字表的读数为0～24，对应加在送粉电机上的0～24 V电压，据此即可得到送粉电机，即送粉盘的转速。

送粉器的气路系统组成为：

气管－电磁阀－流量计－进气管－送粉管。

本送粉器的传动装置主要包括送粉电机，送粉盘。送粉器工作时，储粉筒中的粉末依靠自身的重力通过进粉块落在送粉盘的窄槽中，送粉盘由送粉电机带动匀速转动，当送粉盘窄槽中的粉末到达出粉块后，由送粉载气带动通过出粉接头进入送粉管，再送入等离子喷枪焰流中。

4）等离子喷枪　喷枪是等离子弧发生器，是等离子喷涂设备的核心装置。它汇集水、电、气、粉，喷枪结构和性能的好坏直接影响到工艺过程的稳定和涂层质量的好坏。从性能方面考虑，喷枪应能产生稳定、能量集中、高温、高焓、高速的等离子弧，并具有较高的热效率；从结构方面考虑，喷枪的气密性和水密性要好，使用时不漏水、漏气。正负电极之间绝缘性能可靠，应耐受5 000 V以上高压。

根据喷枪用途的不同，可将喷枪分为外圆喷枪和内孔喷枪两大类。外圆喷枪主要用于工件外圆表面和平面的喷涂，也可用于直径较大的浅内孔表面的喷涂；内孔喷枪用于深径比较大的内孔表面的喷涂。

喷枪一般由三部分组成：前枪体、后枪体和绝缘体。前枪体用于安装喷嘴，后枪体用于安装阴极，绝缘体用于连接前后枪体并起绝缘作用。前后枪体分别通过水冷电缆连接电源的正负极，冷却水从前枪体引进由后枪体排出。前后枪体之间的水路有两种连通方式：一种是枪外走水，其连接管在枪体外，结构简单，不影响枪体的密封性能，但影响美观；另一种是枪内走水，其联结管在枪体内，结构复杂，增加了枪体密封的复杂性，但结构紧凑，外形美观，是喷枪中最常用的形式。

等离子喷枪中最关键的部件是喷嘴，其次是阴极，也称为钨极。喷嘴是非转移弧的阳极，温度很高的弧柱通过喷嘴内壁喷出，因此喷嘴内壁将接受大量的热量。为了不使喷嘴过热及熔化，需要用高导热率的紫铜制造，并要用冷却水流强迫冷却。各种喷枪都配有多种规格的喷嘴，这些喷嘴的喷嘴孔径、压缩角、压缩比以及进气方式存在不同，以适应不同气体、不同工艺的要求。

对于阴极，要考虑它的材料，形状，尺寸，冷却方式等。由于弧电流集中流过阴极斑点，电流密度高达10^3～10^6 A/cm^2，局部热负荷相当高，阴极的烧损直接影响到阴极的使用寿命和工艺的稳定性，因此阴极材料应具有熔点高、蒸发低、电子发射能力强等特点，目前一般采用的电极材料为铈钨。阴极头部的形态对于喷枪的稳定运行也有一定的影响。头部较尖的阴极有利于起弧，但易于烧损；头部也不能太钝，太钝时引起阴极斑点的跳动而造成电弧的不稳定。

表5.3-13为北京航空制造工程研究所研制的PQ系列等离子喷枪性能参数。

5）控制系统　控制系统应能对水路、气路、电路、高

表 5.3-13　PQ 系列等离子喷枪性能参数

喷枪型号	最大功率/kW	最大电流/A	适用范围
PQ-1S	55	1 000	外圆，平面或浅内孔
PQ-1J	55	1 000	同上
PQ-1N	40	500	ϕ100 mm 以上内孔
PQ-2N	38	500	ϕ60 mm 以上内孔
PQ-3N	35	500	ϕ45 mm 以上内孔

频发生器、送粉器等进行控制，使各个部件的动作按喷涂工艺要求按一定的顺序进行，并通过检测信号，使各个动作在一定条件下进行，以确保运行安全可靠。

等离子喷涂技术最早出现于 20 世纪 50 年代，控制系统经过几十年的发展，主要经历了继电器控制系统，PLC 控制系统，工控机控制系统等。

继电器控制系统结构简单，成本低廉，但由于全部为手工操作，无法保证喷涂工艺的重复性，喷涂的涂层质量受人为因素影响较大。PLC 控制系统在一定程度上也存在类似的问题。目前，国外比较先进的等离子喷涂系统采取的控制方式为工控机控制喷涂程序和喷涂过程，显示界面为显示器或触摸屏，如全球最大的热喷涂公司 SulzerMetco 公司的最新型的 Multicoat 等离子喷涂设备。Multicoat 的设计思想基于“平台”概念，即使用相同的主平台，配备不同的软硬件及相应组件，可以实现不同的喷涂工艺。主平台由操作台、过程控制中心和气体管理中心组成。目前，Multicoat 可以进行大气等离子喷涂（APS）、真空等离子喷涂（VPS）和超音速火焰喷涂（HVOF）。在系统配备上，Multicoat 包括操作台、过程控制中心、气体管理中心、热交换器、送粉器、转接柜、电源、喷枪等。

4.1.3　等离子喷涂工艺

等离子喷涂工艺是一个较为复杂的过程，主要包括清洗，吹砂，喷涂，涂层后处理，涂层性能评价等。

(1) 零件表面清理

零件表面清理即去除零件本身所带的污垢，如绣，油，漆等，否则它们会影响涂层与零件的结合，所以在喷涂前必须将其去除。表面清理主要有以下几种方法。

1) 蒸气去油法　热蒸气是即经济又有效的清除有机污染的方法。采用此方法时，将零件在热蒸气中蒸烤 15～30 min，可以有效去除零件砂眼或裂缝内的油渍。常用的清洁剂有醇类、酮类溶液，它们的蒸气温度适中，也较为安全。

2) 烘烤　由多孔材料制作的零件，在加工过程中会吸收大量的油。若不清除，这些油在喷涂过程中会由于受热而渗出零件表面，防碍涂层的形成，用其他方法又很难去除，此时采用火烘法比较合适。此方法即是将零件放在 300～400℃的炉内烘烤 4～6 h，可去除零件中的油渍。

3) 汽油清洗　即采用汽油来清洗零件表面，以去除零件表面的油渍。由于此方法成本低廉，简单易行，除油效果又比较好，故此方法是实际工作中最常用的方法。

另外还有酸洗、吹湿砂、超声波清洗等方法，这里不再介绍。

(2) 零件表面粗化

零件表面清理后，一般都需要用不同的方法使零件表面粗化，以提高涂层与零件基体的结合面积，进而提高涂层与零件基体的结合强度。

1) 吹砂法　吹砂法即利用压缩空气将砂粒以高速撞击到零件表面上，将零件表面粗化。影响吹砂效果的因素主要有砂粒的种类及大小，零件的材料及硬度，压缩空气压力等。

采用有棱角的砂粒吹砂所获得的零件表面粗糙度最好，吹砂效率也高。吹砂所用砂粒必须是干净，干燥，无油的，常用的砂粒品种有氧化铝和碳化硅。砂粒的大小将影响吹砂后零件表面的粗糙度，进而影响喷涂后涂层表面的粗糙度。采用较粗的砂粒，则吹砂后零件表面粗糙度高，形成的涂层粗糙度也高，反之则低，因此可根据对涂层的要求来选择合适的砂粒粒度，一般常用的砂粒粒度为 200～700 μm。压缩空气压力的大小也会影响吹砂的效果，压力大，则吹砂后零件表面粗糙度高，吹砂效率也高，反之则低。另外，吹砂法也是一种重要的零件表面清理的方法。

2) 机加工粗化法　机械粗化法即采用机械加工的方法使零件表面粗化，提高涂层与基体的结合面积和结合强度。常用的机械加工方法有车削和磨削。采用此方法一般是因为要求的涂层较厚，涂层的收缩率较高，或零件端部要求有端栏的涂层。

(3) 喷涂

喷涂需控制的参数主要有主气流量，次气流量，送粉气体流量，喷枪功率，送粉量，喷涂距离和角度，冷却水温度等。

1) 基体工件的温度　基体温度是喷涂工艺一项重要的参数。大多数工件在喷涂前需要进行一次预热，目的是为了去除湿气，有利于涂层与基体的结合，并可控制基体相对涂层的热膨胀。在喷涂过程中对零件温度的控制有 3 个方法：一是控制合适的喷涂距离；二是采用间歇喷涂法，即将所要喷涂的总厚度分成多次完成，每次之间存在间歇；三是在喷涂过程中对零件采用压缩空气等冷却，压缩空气应吹向零件不喷涂的部位，且冷却气体应非常清洁和干燥，以免因污染喷涂表面而削弱涂层结合强度。基体金属的温度一般控制在 200～300℃左右为宜。

2) 喷涂距离和喷涂角度　粉末在等离子焰流中加热和加速都需要一段时间，因此应有一个合适的喷涂距离。喷涂距离过近，会因粉末加热不良在基体上撞击变形不充分而影响结合强度，还会使零件受等离子焰流的影响而产生氧化，同时也会使基体温升过高，产生变形。但喷涂距离过远又会使已经加热到熔融状态的粉末在与零件接触时温度降低，粉末粒子的飞行速度也有所下降，同样影响涂层与基体的结合，喷涂效率也会明显降低。

为获得致密涂层，在喷涂时等离子焰流轴线与被喷涂工件表面之间的角度（即喷涂角度）不应小于 45°，以 90°～45°的角度对工件表面进行喷涂时对涂层结构不会产生很大影响。然而当喷涂角小于 45°时，由于“遮蔽效应”的影响，涂层结构将急趋恶化。“遮蔽效应”即在小角度喷涂的情况下，第一层粉末微粒粘于工件表面后这些微粒将阻碍继续喷涂的粉粒，成为对粉粒的尖角喷涂，结果在粉粒背面形成空穴，导致涂层结构疏松。故喷涂角度小于 45°是绝对不允许的。

主气、次气及送粉气流量主气流量和次气流量是重要的工艺参数之一，它直接影响到等离子焰流的热焓和流速，继而影响喷涂效率和涂层气孔率等。气流量过大或过小均会导致喷涂效率的降低和涂层气孔率的增加。若气流量过大，则离子浓度减少，同时会冷却等离子焰流，使热焓和温度下降，不利于粉末的加热，造成粉末熔化不均匀，使喷涂效率降低，涂层组织疏松，气孔率增加。反之若气体流量太小，会使喷枪工作电压下降，焰流软弱无力，并容易引起喷嘴烧蚀。等离子喷涂时常用的主气流量为 40 L/min 左右，次气流量为主气流量的 5%～10%左右。

送粉气的流量一定要与主气流量相适应，以避免出现相



互干扰的现象。由于目前送粉方式一般为枪外送粉，即送粉方向与等离子焰流垂直，若送粉气的流量过大，则会使部分粉末随送粉气穿过等离子焰流，若送粉气的流量过小，又会使部分粉末在等离子焰流表面反弹而未进入等离子焰流，两者都会使喷涂的沉积效率降低。一般送粉气的流量为4 L/min左右。

3）送粉量及喷枪功率　送粉量及喷枪功率这两个工艺参数是喷涂过程中重要的参数，又是需要经常变动的参数，而且这两个参数是互相联系的，在确定这两个工艺参数时重点是保证二者的恰当匹配。

送粉量和喷枪功率的恰当匹配指的是对于由一定成分一定粒度组成的粉末，在不同的送粉量下喷枪应当有不同的功率。当送粉量不变时，如果喷枪功率过小，则粉末熔化不良，涂层中夹杂的生粉多，粉末碰撞工件时变形不充分，并有较多粉末弹跳损失，这时沉积效率低，且涂层与基体结合强度低。反之，如果喷枪功率过大，虽然粉末的熔化和撞击变形良好，但粉末受热氧化烧蚀太多，涂层中夹杂着较多的烟尘，同样使沉积效率降低，结合不牢，在喷涂金属粉末时尤其如此。因此，对于由一定成分一定粒度组成的粉末，送粉量的大小和喷枪功率的最佳值要相适应。生产中确定送粉量和喷枪功率最佳对应值的方法是采用喷涂沉积效率试验，一般沉积效率曲线最高处的喷枪功率为最佳值。

4）喷枪移动速度　喷枪移动速度对涂层质量和喷涂效率的影响在一定的范围内并不明显。在一定送粉量下喷枪移动速度或喷枪与工件相对速度的慢与快，意味着单位时间内喷枪扫过工件面积的多少或每次喷涂层的厚度，所以在送粉量一定的情况下，调节喷枪的移动速度实际上是控制每次喷涂层的厚度。每次喷涂层的厚度不宜太厚，一般情况下，每次喷涂的涂层厚度不要超过0.01～0.02 mm。若每次喷涂的涂层厚度过厚，则会造成涂层收缩应力变大，降低涂层与基体的结合强度。此外喷枪移动速度对工件的温升也有影响，为避免基体局部温升过高而造成热变形或热应力过大，也希望选用较快的喷枪移动速度。

综上所述，要获得高质量的涂层，则必须选用上述主要工艺参数的最佳配合，表5.3-14为几种材料的喷涂工艺参数。

表5.3-14　几种材料的喷涂工艺参数

喷涂材料	功率/kW	工作气体流量 /$m^3\cdot h^{-1}$	送粉气流量 /$m^3\cdot h^{-1}$	粉末粒度 /μm
Al_2O_3	30～35	$N_2$2.5 $H_2$0.3	$N_2$0.5	5～45
ZrO_2	32～38	$N_2$2.0 $H_2$0.3	$N_2$0.6	5～45
Fe－Cr－B－Si	25～24	$N_2$1.6 $H_2$0.1	$N_2$0.6	45～150
W	22～28	$N_2$2.25 $H_2$0.3	$N_2$0.6	76～44
Mo	15～20	Ar1.8 $N_2$0.2	$N_2$0.45	88～44
耐磨铸铁	10～15	Ar1.8 $N_2$0.15	$N_2$20.5	88～44

（4）涂层性能评价　评价涂层性能好坏的参数主要有涂层与基体的结合强度，剪切强度，涂层本身的气孔率等。有些涂层根据其工作环境需要，还需进行金相分析，硬度测试（包括宏观硬度，显微硬度，高温硬度等），冲击试验，耐腐蚀性试验等。

4.2　层流等离子喷涂

4.2.1　层流等离子射流

1）层流与湍流　任何流体（气体、液体）的流动都有层流与湍流两种流动状态。流体的流速小于某一值时，流体处于层状或流束状运动，流体质点间互不干扰地前进，没有横向运动，这种流动状态叫做层流；反之，流体的流速大于该值时，流体有规则的运动受到破坏，质点交错而混乱地向前运动，除了纵向运动外，还有附加的横向运动，这种流动状态称为湍流。流体处于何种流动状态的判据，是其雷诺数的大小：

$$Re=\frac{VL}{v} \tag{5.3-40}$$

式中，V为流体的流速；L为浸润水力直径；v为运动黏度。

由层流转化为湍流时对应的雷诺数称为上临界雷诺数；由湍流转为层流时对应的雷诺数称为下临界雷诺数。一般把下临界雷诺数定义为流体的临界雷诺数。欲使流体处于层流状，需使其诺数小于临界雷诺数。由于有这一通用判据，使许多不同的流动情形具有了流动相似性。对层流等离子喷枪的设计大多是根据流动相似性原理进行的。

等离子射流和一般流体的流动一样，亦有层流与湍流两种流动形式。目前用于喷涂的等离子弧焰（射流）大多为湍流状态。

2）层流等离子射流的形成　层流等离子喷枪（发生器）的结构如图5.3-39所示。它与湍流等离子喷枪的显著区别是气体通道和气体引入环的结构。在湍流喷枪中，该零件通常称为气体分配环，而在层流喷枪中该零件叫导流环更为确切。之所以称之为导流环，是因为它对初始气流进行了整流，使其湍流度大大降低，使得初始进入放电室的气体基本上是层流状的。导流环上的许多小孔（约ϕ1 mm）就起了这一作用。因为导流环上小孔的直径很小，对应的雷诺数降低，因此达到了初始整流的目的。

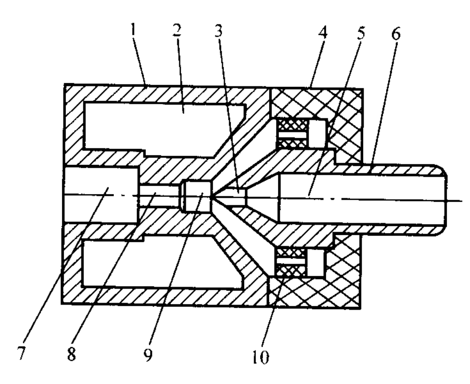


图5.3-39　层流等离子发生器结构示意图
1—前枪体；2—冷却水；3—电极头；4—绝缘子
5—冷却水；6—电极杆；7—扩张通道；8—压缩通道；
9—放电通道；10—气体导流环

为了说明在图中所示结构特点的放电通道中能够产生层流等离子射流，首先简要分析一下气体在放电通道中的流动情况。如图5.3-40所示。

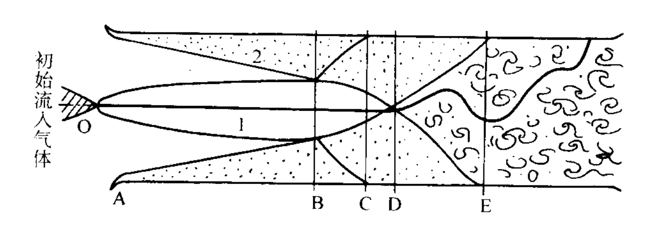


图5.3-40　气体在放电通道中的流动简图

气体进入放电室吸收电弧能量后，体积膨胀，沿着通道

向下游流动。图中1区是中心电弧热层区（假定初始来流为层流的情况下，属层流），2区为边界冷层（属湍流），气流在通道中B处冷热层交汇，加速了热交换。在C处，电弧热量传到通道壁上；当到达D处时，周围边界层发展到中心，中心层流消失，热层被破坏；在DE段中逐渐过渡为湍流流动。从D点开始弧柱本身与湍流气流相互作用）。在E以后，气流成为稳定的湍流流动，充满整个通道（冷热气流充分混合）。层流等离子喷枪就是使中心层流区不论在空间上还是时间上均要维持足够的程度，并使之喷出枪外。

经以上简要分析，不难发现层流喷枪的结构恰好满足上述维持层流的要求。气体经放电室前部大锥度段压缩后，流线进一步规则化。接着接触电弧进入较细的通道（零件21中），在通道变细的台阶处，边界边进一步受到中心热层的挤压而变得紧贴通道壁，同时由于管道的变细使雷诺数变小，维持了层流。在通道的出口段（喷嘴），口径突然扩张，消除了逐渐变厚的湍流边界层对已形成的中心层流射流的影响。经过这一系列的过程，层流射流产生并维持住了。层流等离子射流照片见图5.3-41。

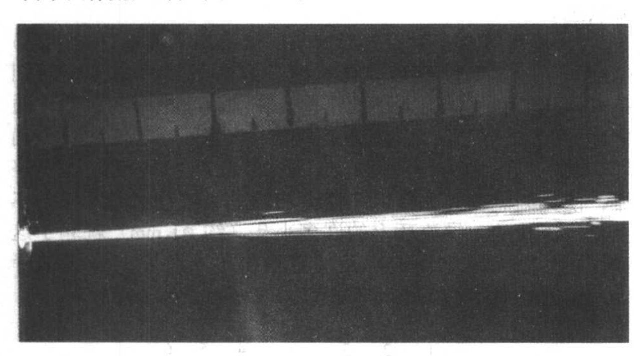


图5.3-41 熔化粉末的层流等离子射流照片

4.2.2 层流等离子射流的有关特性

1）噪声特性　层流等离子喷枪的噪声低是它的一个显著特点。由于层流流动的规则性，层流射流形成时对周围气氛的扰动非常小，弧焰稳定燃烧后，噪声相当低（72 dB），相当于一般室内讲话的声音。这与湍流等离子弧焰有天壤之别（工作时达120～130 dB）。层流喷枪的噪音随电流的变化如图5.3-42。曲线族是由不同的气体流量形成的。各曲线的噪声峰值出现在300 A以前，且随气体流量而增加。实验现象是：当喷枪电流 $I \geqslant 300$ A时，电弧稳定燃烧。此时弧焰呈稳定的层流状，喷枪进入低噪声状态，噪声计指针亦很稳定；当电流 $I < 300$ A时，电弧不稳定，发出间断的微弱爆鸣，噪声计指针亦随之摇摆，各曲线的噪声峰值正是这种爆鸣的最大值。说明在这种情况下，电弧不时地发生分流现象（弧柱某处在枪内与通道内壁击穿）。这与电弧没有完全充满通道及冷缸气对弧的稳定不够有关。当电流变大时，电弧充满通道，这时不仅边界层冷气对它有稳定作用，且通道壁（水冷）本身对其也有稳定作用。

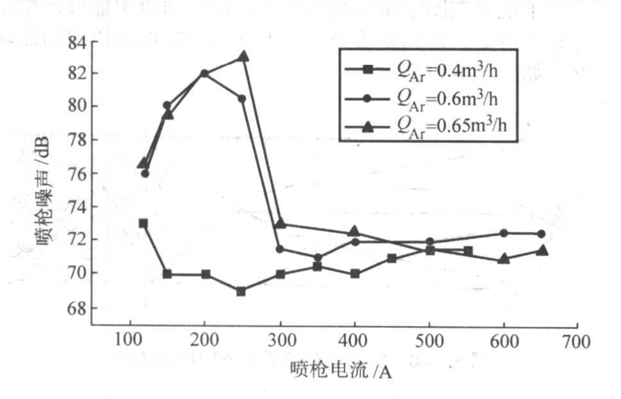


图5.3-42 层流等离子喷枪的噪音特性

2）层流等离子喷枪的伏安特性　在层流限定的气体流量范围内，基本上是略有上升的平特性，见图5.3-43。

说明喷枪放电室内的气体的电离度随电流的增加而增加。其等效电阻相应下降，从而保持了平的 $U-I$ 特性。曲线还显示，整个 $U-I$ 曲线随气体流量增加呈下降趋势。这一现象说明气体流量 增加，导电粒子数增加，电阻下降，所以在同一电流值下的弧电压稍有下降低。由于有干的伏安特性，层流喷抢的功率显然随电流线性地变化。湍流喷枪的伏安特性因喷嘴类型较多相对比较复杂。

层流等离子弧焰的另一显著特点是弧柱集中而狭长，发散角小，见图5.3-42。这一特点保证了层流弧焰的热保留性，使之与周围气氛在径向方向基本没有热交换。此外，湍流弧焰长度一般不随电流变化，而层流弧焰却随电流大致线性地伸长。其变化曲线如图5.3-44。这一点显示，气体吸收电弧能量后，基本按气态方程描述的线性膨胀，这进一步说明层流气体流动的规则性。

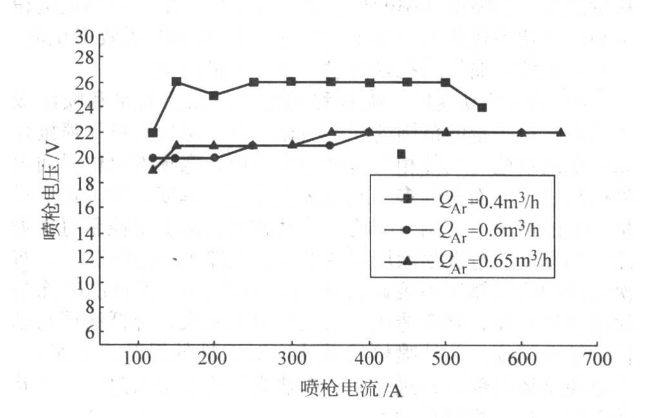


图5.3-43 不同气体流量时的层流等离子喷枪的伏安特性

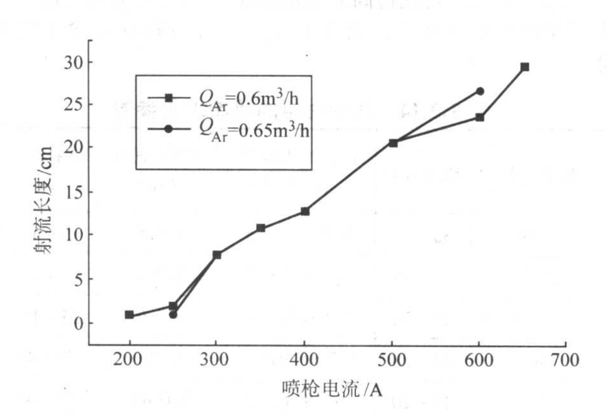
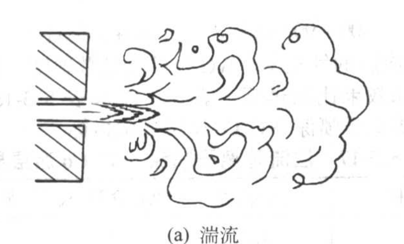


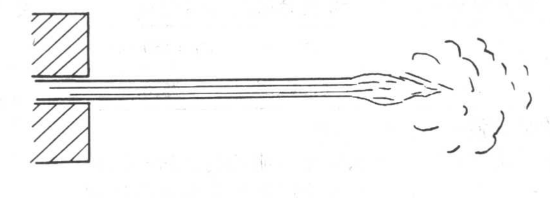
图5.3-44 层流等离子喷枪的弧焰长度随电流的变化

3）弧焰中的气氛含量估计　湍流、层流两种状态的等离子射流，对周围气氛的扰动及与环境的热交换截然不同，两种射流对周围扰动的示意图如图5.3-45所示。湍流射流的出口速度很高，对周围气氛的扰动很大，以至于在距喷嘴几厘米的范围内就很快淹没在周围气氛中。层流梳射流则不同，在距喷嘴30～50 cm的范围内仍能维持流束状。两种射流的状态不同，必然导致弧焰中气体相对含量的区别。若工作气体是Ar，则两种射流中其含量及 O_2（来自空气）含量的变化将如图5.3-46所示。层流弧焰的这种特性，有利于喷涂材料成分的稳定。





(a) 湍流



(b) 层流

图 5.3-45 湍流与层流等离子射流示意图

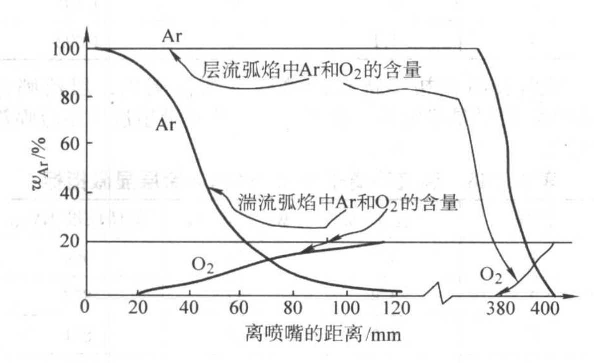


图 5.3-46 层流（上）与湍流（下）等离子射流中气氛含量示意图

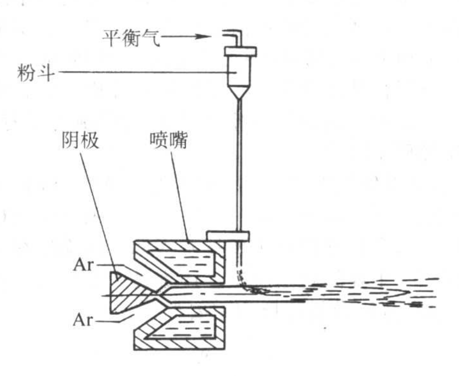


图 5.3-47 自重送粉示意图

4.2.3 层流等离子体喷涂工艺特点

基本特性测试表明，层流喷枪具有噪声低、束流集中（发散角小）、热保留性好、焰流中含有原工作气体成分高等优点。这是喷涂工艺试验的基础。

(1) 喷涂工艺试验举例

等离子喷涂的一关键问题就是把喷涂粉末送入弧焰中去。湍流等离子喷涂中，一般使用足够流量的载气（Carrying Gas）把粉末送入等离子焰流以加热熔化。但对层流等离子射流而言，情况有很大不同，载气的扰动足以破坏层流场造成能量损失，使喷涂无法进行。经大量反复试验，发现靠粉末的自重使其进入焰流，自重送粉是比较理想的送粉方式，见图 5.3-47。经用多种粉末喷涂实验表明，对密度较大的金属或化合物粉末，层流等离子的喷涂结果均相当或优于湍流喷涂。以下为两喷涂实例。

1) 铝青铜（Cu/Al）的层流等离子喷涂　Cu/Al 涂层是中温（<982℃）减摩涂，其结合强度和硬度是主要技术指标。下面把这种方式所喷涂层与湍流涂层作一比较。

① Cu/Al 涂层的显微硬度及气孔率（含氧化物）　试验中，在保证层流较强的的条件下，选定一个参数（此处为距离 d）变化，再把相应的试验结果与湍流喷涂结果相比较所用层流等离子主要的参数为：

电流 $I = 550$ A　Ar = 0.6 m³/h　粉轮 S　转速 $n = 12$ r/min

电压 $U \approx 30$ V

喷涂距离 $d_{1,2,3} = 65$ mm，100 mm，150 mm

湍流主要参数：电流 $I = 500$ A，Ar = 150 格　S 轮　$n = -27$ r/min

电压 $U = 60 \sim 70$ V，H_2　5 格　载气 30 格，　喷嘴 GH

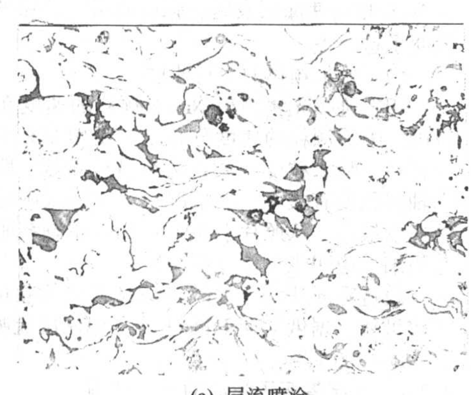
$d = 130 \sim 150$ mm

所用喷枪、射流状态均不相同，两种喷涂参数原则上没有可比性，但从应用角度，涂层性能是可比的。试验结果见表 5.3-15。金相组织如图 5.3-48。

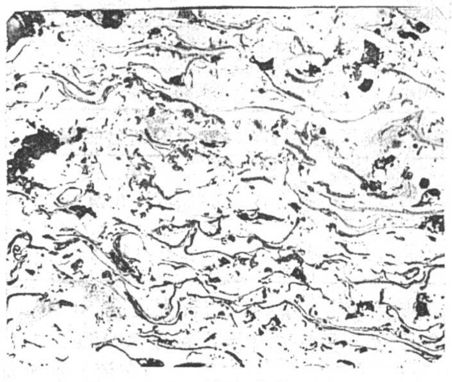
表 5.3-15 铝青铜的层流与湍流等离子喷涂结果比较

射流	距离/mm	气孔率/%	显微硬度 HV_{100}（平均）
层流	65	21.18	254
	100	12.48	295
	150	12.87	316
湍流	130 ~ 150	11.78	315

② Cu/Al 涂层的结合强度　在上述涂层显微组织较好的喷涂距离处，进行结合强度试样的喷涂。其结果如下（表 5.3-16）：



(a) 层流喷涂



(b) 湍流喷涂

图 5.3-48 铝青铜（Cu/Al）涂层的显微组织

表 5.3-16　层流等离子喷涂铝青铜涂层的结合强度

喷涂距离	$d_1 = 110$ mm	$d_2 = 150$ mm	$d_3 = 180$ mm
结合强度/MPa	49.5	61.4	75.6

湍流喷涂的结合强度为：43.2 MPa。

显然，层流喷出的涂层结合强度比湍流的高。这一结果由显微组织照片不难得到解释。层流涂层的气孔率虽然比湍流涂层的略高，但粉末颗粒的层界却不像湍流涂层那样明显，这无疑会提高涂层的结合强度。至于气孔率略高，是因为粉末粒度范围宽，未融化的大颗粒在喷涂过程中附着在试样的喷涂面上，随着喷涂的进行埋在了涂层里，增加了涂层的孔隙。金相照片中那些圆形亮点或气孔即为不熔颗粒所致。若将粉磨粒度范围变窄，是颗粒尺寸更均匀，则效果可得到进一步改善（俄罗斯航空工艺研究院制备了专用粉末，用于层流等离子喷涂）。

2）钴包碳化钨涂层　碳化钨涂层（WC－Co）主要用作中温耐磨涂层（一般 < 530℃）。涂层的气孔率、WC 含量及显微硬度、结合强度是其主要技术指标。该涂层在空气中喷涂不易控制，主要问题是脱碳，还容易产生裂纹，使结合强度降低。WC 分解及氧化反应主要如下：

$$WC \xrightarrow{受热} W + C \tag{5.3-41}$$

$$2WC \xrightarrow{受热} W_2C + C \tag{5.3-42}$$

$$WC + O_2 \xrightarrow{\Delta} W + CO_2 \uparrow \tag{5.3-43}$$

一般要求碳化钨含量在 45%以上，见图 5.3-49。显微硬度 HV_{300} 在 800～900 以上，气孔率 4%左右。

① 涂层的气孔率、WC 含量及显微硬度　优化工艺参数后，喷涂效果比较理想。表 5.3-17 和表 5.3-18 分别为层流和湍流等离子喷涂 WC/Co 涂层显微指标。

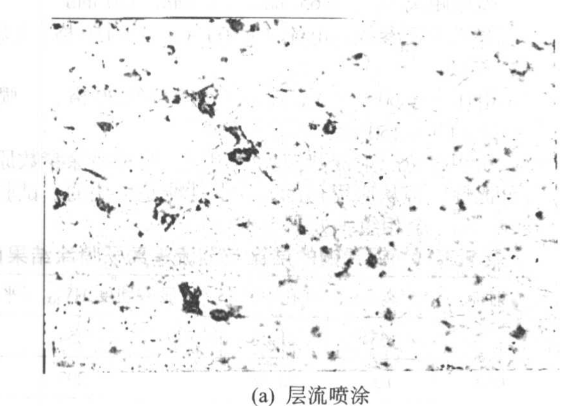
表 5.3-17　层流等离子喷涂 WC/Co 涂层显微指标

试样	气孔率/%	WC 含量/%	显微硬度 HV_{300}
1	4.2	45	1 078
2	4.7	49	1 183
3	4.2	41	1 101
4	4.1	45	1 092

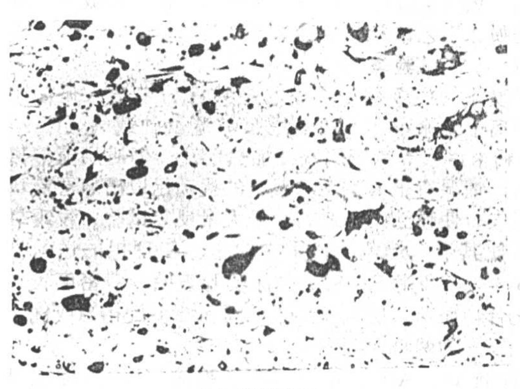
数据表明在初步优化的喷涂参数范围内，层流喷涂 WC/Co涂层量是稳定的，重复性好，其质量超过了湍流喷涂的结果。

表 5.3-18　湍流等离子喷涂 WC/Co 涂层显微指标

试样	气孔率/%	WC 含量/%	显微硬度 HV_{300}
1	3.7	46	959
2	3.8	42	877
1’	5.2	41	871
2’	6.0	45	788
3’	4.2	42	903
4’	5.6	43	914



(a) 层流喷涂



(b) 湍流喷涂

图 5.3-49　WC/Co 涂层的金相组织

② WC 涂层的结合强度　用较好的喷涂参数做了结合强度试验，试验按 HB—5476—91 进行。试验发现与湍流喷涂的厚度相近的涂层相比，结合强度高出很多。层流和湍流等离子喷涂 WC/Co 涂层的结合强度分别见表 5.3-19 和表 5.3-20。

表 5.3-19　层流等离子喷涂 WC/Co 涂层的结合强度

试样组号	第一组	第二组	第三组
结合强度（平均）/MPa	55.86	68.86	69.08

表 5.3-20　湍流等离子喷涂 WC/Co 涂层结合强度

试样组号	第一组（厚度 0.28 mm）	第二组（厚度 0.24 mm）
结合强度（平均）/MPa	33.1	46.5

一般来说，湍流喷涂 WC：涂层的结合强度在 50 MPa 左右，很难达到 60 MPa，而层流所喷涂层已接近 70 MPa。

③ X 射线衍射分析　把两种射流（层流与湍流）所喷涂层的 X 射线衍射谱与粉末材料的衍射谱（图 5.3-50）做对比分析发现，层流等离子喷出的涂层更接近于粉末材料。层流涂层只在 50°～58°的范围出现了比 WC 主峰矮的杂峰，这些杂峰为不希望出现的相。湍流涂层在 47°～56°、8°～83°、90°～94°等处均出现了杂峰，且在 47°～56°的杂峰超过了 WC 主峰高度，说明相对含量较高。这样的杂峰会影响涂层的质量，如 W_2C 相会使涂层发脆，强度降低。涂层的结合强度数值也说明了这一点。

（2）粉末颗粒的飞行速度

用轨迹曝光法测得 NiCrA 颗粒的速度在 200～300 m/s 的范围。喷涂颗粒的速度分布是一个很复杂的问题。它既与喷涂材料、粉末粒度有关，又与喷枪参数、距喷嘴的远近、偏离轴线程度有关。一般情况下，中轴线附近刚脱离焰流的颗粒速度最高。从照片上也能看出，中轴线附近飞行颗粒的轨迹最细，说明飞行速度最快。

轨迹曝光法是一种既经济又方便的测量手段，判断精度比较可靠。据俄罗斯 НИАТ 称，他们层流喷涂的粉末速度也在 200～300 m/s。

4.2.4　层流等离子喷涂的应用范围

从应用范围上看，乌克兰巴顿所的微束等离子喷枪主要

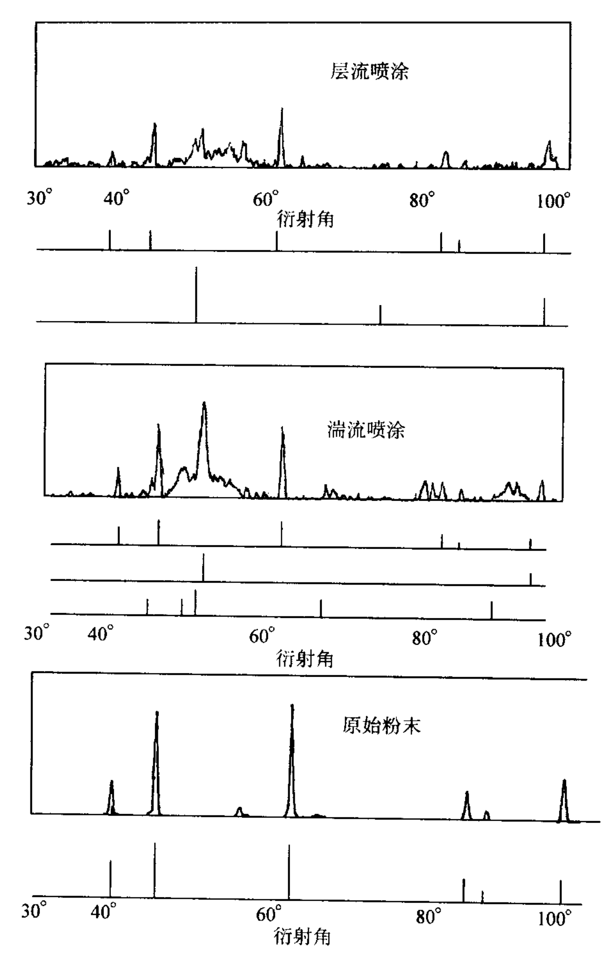


图 5.3-50　WC 涂层的 X 射线衍射谱对比

用于窄片，薄壁件以及其他一些不能严重受热的零件。应用对象包括：纺织机械，印刷及烟草业的设备，飞行器部件、仪器，电子器件、磁芯、电容，加热元件及医疗器械等。其优点是能耗小，噪声低。喷涂距离从 80 mm 减到 15 ~ 20 mm 时，对自重送粉的 Ni 基合金来说，可由喷涂变为重熔模式，并与基体界面形成 15 ~ 20 μm 如的扩散层。

俄罗斯 НИАТ 称，他们已把层流等离子喷涂用于燃气涡轮发动机的批量生产与修复中。主要用于小型零件和喷涂面积不大的部位。经赴俄考察发现他们已推广这种工艺，不仅在发动机上，在飞机上也有许多零件由用了层流等离子喷涂。如 SU - 27 上有上百件口盖锁，喷涂 N1/A1 涂层后，寿命提高近 200 倍。

他们的层流等离子喷涂用的是自重送粉。1995 年又开发了一种新方法：两根粉嘴对吹，以消除载气对焰流的影响。据他们介绍，层流等离子喷涂的涂层，结合强度可到 8 kg/mm^2，气孔率 4% ~ 2%。他们用的是工作气体 $10Ar + N_2$。

总之，初步工艺试验研究表明，对流动性好、密度较大的粉末，采用自重送粉法用层流喷出的涂层，其性能优于湍流喷涂的涂层。且能耗、耗气、噪声等，均远低于湍流等离子，完全可以推广应用。但对较轻的粉末，如何选择粉末的粒度及其对熔化效果的影响还需做进一步工艺探索。

4.3　真空等离子喷涂设备及工艺

4.3.1　真空等离子喷涂特点

等离子喷涂最早出现时是在大气中进行的，称为大气等离子喷涂（APS）。此时等离子焰流要从周围环境中吸卷入大量空气，喷涂距离越大，吸入的空气量越多。在喷涂距离为 100 mm 处，吸入的空气量可达 90% 左右。焰流中吸入的空气使喷涂颗粒发生氧化并降低射流的能量，使喷涂颗粒的速度降低，加热不足。

为了克服上述缺点，并解决一些有毒材料不能在大气中喷涂的问题，前联邦德国在 20 世纪 70 年代发明了低压等离子喷涂（LPPS）技术，又称为真空等离子喷涂（VPS）。真空等离子喷涂是在低压充氩密闭容器中进行的，其基本原理同大气等离子喷涂类似，但是在真空气氛中进行的。被喷涂颗粒送入等离子焰流中加热至熔化或半熔化状态后，因无大气阻力，将以超音速喷射到工件表面形成涂层。由于整个工艺过程都是在低压充氩气氛中进行的，因此与传统的大气等离子喷涂相比，真空等离子喷涂具有以下特点。

1）喷涂在低压充氩气氛中进行，等离子焰流长度由常压下的 40 ~ 50 mm 被拉长到 300 ~ 400 mm，粉末在焰流中得到充分的熔化，因此，涂层与基体结合强度高，涂层致密，气孔率小于 1%。

2）在喷涂过程中保持气压平衡，消除了氧化、氮化和其他污染，因此特别适合制备各种活性金属材料（钛、钨、钽、铌等）或含有活性元素合金材料（如 MCrAlY）的涂层及复合涂层等。

3）惰性气氛保护可以大大提高工件的预热温度，并有利于基体与涂层之间相互扩散，减少涂层本身的内应力。

4）被喷涂零件接辅助电源，可以对工件进行离子溅射清洗或电子轰击加热，这都有助于基体与涂层结合强度的提高。

5）喷涂在密闭容器中进行，消除了噪声和辐射，改善了喷涂对环境的污染。

4.3.2　真空等离子喷涂设备组成

真空等离子喷涂设备共包括三大部分：等离子喷涂设备（主机）、工件和喷枪操作系统、抽真空系统。图 5.3-51 为北京航空制造工程研究所制造的 ZDP - 1700 型真空等离子喷涂设备组成简图。

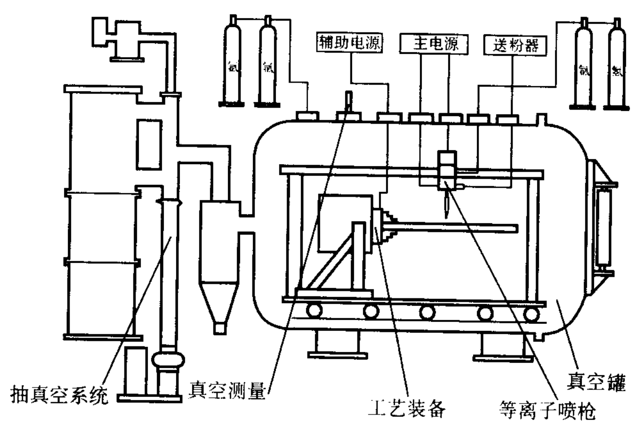


图 5.3-51　ZDP - 1700 型真空等离子喷涂设备

1）等离子喷涂设备（主机）　主机即为一套大气等离子喷涂设备，包括电源、热交换器、控制柜、送粉器、喷枪等，这里不再详细介绍。

2）工件和喷枪操作系统　工件和喷枪操作系统既可为一简单的机械化装置，又可采用真空喷涂机械手。对机械手的要求主要是要有足够的自由度（一般最少为五个），要有一定的抓重能力，并且要有良好的密封性，防止在抽真空时发生漏油、漏气等故障。

3）真空系统　真空系统主要由真空喷涂室、抽真空管道、粉尘过滤器、真空控制台、真空泵和真空测量等部分组成。

ZDP - 1700 型真空等离子喷涂系统的真空喷涂室采用圆柱型双层钢板焊接结构，一端为椭圆封头，另一端为活动门，



落地卧式安装，喷涂室内径 1 700 mm，长 2 300 mm，可以保证有足够大的空间来满足生产的需要。罐身和封头钢板夹层间通水冷却，保证密封部位的密封圈不会因温度过高而过早老化。喷涂室内底部两侧焊接了两条导轨，导轨上装有可移动拖板，喷枪和工件操作系统放置在拖板上，拖板移动方便，确保工件安装和喷涂室清洗方便。喷涂室罐身上开有多个窗口，用于安装喷枪电缆接头、充气接头、送粉接头、真空规管和观察窗等。

真空泵和真空测量：由于真空等离子喷涂对喷涂室的真空度要求不是很高，因此采用一般的罗茨泵（泵的极限真空度为 0.1 Pa）即可以满足要求。另外，根据真空喷涂的要求，喷涂时真空室内的压力波动应小于 130 Pa，因此喷涂时还要采用变频调速器来调节真空泵的转速，使排气量和进气量相等，以保证真空室内压力的动态平衡。真空室压力的测量是通过一个中真空计和一个低真空计来实现的，前者用于真空室极限真空度的测量，后者用于喷涂时真空室真空度的测量。

4）粉尘过滤器　在真空等离子喷涂中，粉尘过滤器是一个非常重要的部件。它配置在真空罐和真空机组之间，既可以冷却由真空室抽出的热气流，又可以过滤气流中所夹杂的粉尘，避免粉尘直接进入真空泵而造成真空泵的污染和泵腔的磨损，确保系统正常运转。图 5.3-52 为粉尘过滤器结构简图。

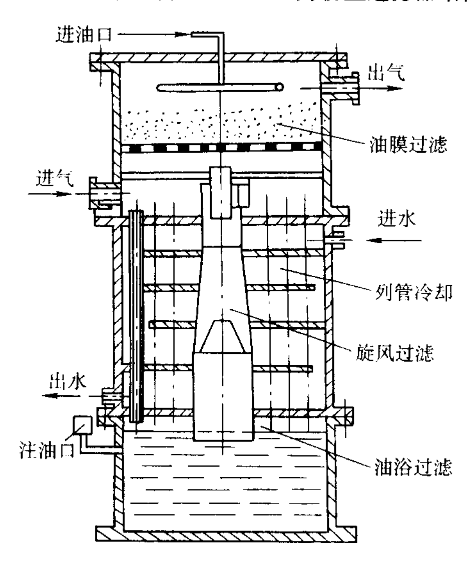


图 5.3-52　粉尘过滤器结构简图

抽气时，含尘热气流进入粉尘过滤器，首先通过列管式热交换器左边的管道冲向粉尘过滤器的底部，并被列管式热交换器间的冷水冷却。粉尘过滤器的底部装有真空泵油，使部分粉尘粘附在油面上，而气流则沿右边的管道上行，进入旋风除尘器。气流中的粉尘在离心力的作用下，紧贴水冷壁面旋转，最终掉入下面的真空泵油中。而气流则继续向上流动，进入顶层的油膜除尘器。该除尘器由不锈钢丝网、陶瓷环等组成，并附着有真空泵油，以粘附气流中的精细粉尘。这种由多个部分组成的除尘器除尘效率高，保证了真空泵的正常运转。

4.3.3　真空等离子喷涂工艺

真空等离子喷涂是一个较为复杂的过程，图 5.3-53、表 5.3-21 为真空等离子喷涂工艺流程图及各工作区域的工作内容和真空度。

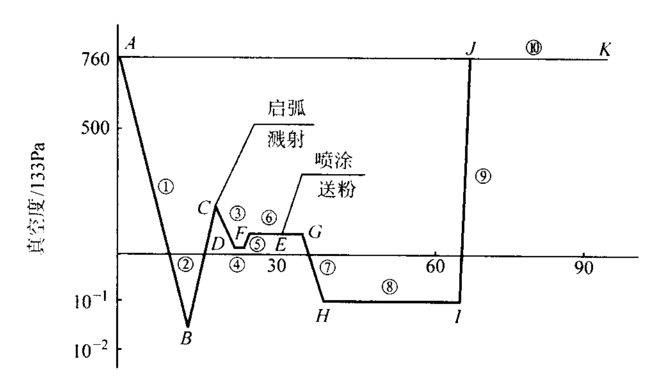


图 5.3-53　真空等离子喷涂工艺流程图

其中 *A* – *B* 为快速抽真空阶段，*B* – *C* 向真空室内充填氩气，并在 *C* 点启动等离子弧，在 *C* – *D* 段等离子焰流膨胀并拉长，*D* – *E* 进行离子溅射清洗或电子轰击，*E* – *F* 向真空室内填充氩气，调整压力到合适值，*F* – *G* 进行等离子喷涂，达到合适的涂层厚度，*G* – *H*、*H* – *I*，为继续抽真空，也可充填氩气，使工件缓慢冷却，*I* – *J* 为向真空室内充填空气直至大气压，然后打开真空室门，装卸零件。

由于真空等离子喷涂具有以上所述的优点，因此采用真空等离子喷涂工艺制备的涂层比大气等离子喷涂所制备的涂层性能要好许多，表 5.3-22 为几种粉末的真空等离子喷涂（VPS）涂层和大气等离子喷涂（APS）涂层的性能对比。

表 5.3-21　真空等离子喷涂各工作区域的工作内容和真空室内的真空度

区域		工作内容	真空度/kPa	区域		工作内容	真空度/kPa
①	*A* – *B*	真空室抽真空	0.006 65	⑥	*F* – *G*	等离子喷涂	10.64
②	*B* – *C*	真空室充氩气	26.6	⑦	*G* – *H*	抽真空	0.133
③	*C* – *D*	继续抽真空	4.655	⑧	*H* – *I*	自然冷却	0.133
④	*D* – *E*	离子溅射	4.655	⑨	*I* – *J*	真空室充大气	101.08
⑤	*E* – *F*	充填氩气	10.64	⑩	*J* – *K*	装卸工件	101.08

表 5.3-22　几种粉末的真空等离子喷涂涂层和大气等离子喷涂涂层的性能对比

粉末材料	涂层结合强度/MPa		气孔率/%		显微硬度 $HV_{0.3}$	
	VPS	APS	VPS	APS	VPS	APS
Ni25Cr5Al0.5Y	>95	59	0.5	3	384	232
Ni25Co20Cr8Al4Ta0.6Y	>95	65	0.34	3	490	370

续表 5.3-22

粉末材料	涂层结合强度/MPa		气孔率/%		显微硬度 $HV_{0.3}$	
	VPS	APS	VPS	APS	VPS	APS
Cr3C2 – 25Ni/Cr	75	38	1.0	3.5	650	590
WC/Co	85	56	1.2	4	1 173	965

当然，任何一种工艺都会有其一定的局限性，真空等离



子喷涂的局限性主要是零件尺寸受到真空室尺寸的限制，对零件内壁的喷涂较为困难等。

4.4 等离子喷涂涂层类型及其应用

等离子喷涂（包括大气等离子喷涂和真空等离子喷涂）由于等离子焰流温度高，理论上可以喷涂所有已知材料，因此目前在热喷涂中占有最重要的地位。其制备的涂层种类多，涂层性能好。表5.3-23为等离子喷涂涂层的主要应用领域和主要类型。

表5.3-23 等离子喷涂涂层的应用领域和主要类型

应用领域	主要类型	涂层材料
防护涂层	抗高温氧化涂层	镍基、钴基合金、MCrAlY合金、氧化物陶瓷
强化涂层	耐磨粒磨损和冲蚀磨损涂层	碳化物、自熔性合金、氧化物陶瓷
	耐摩擦磨损涂层	钼合金、有色金属合金、自熔性合金、氧化物陶瓷
	强腐蚀介质中的耐磨涂层	自熔性合金、高温合金、陶瓷
特殊功能涂层	热障涂层	氧化物陶瓷
	封严涂层	金属及非金属复合材料

（1）抗高温氧化涂层

抗高温氧化涂层的作用是用来阻止或减小基体材料在高温下的氧化现象，该涂层在改善基体材料高温性能的同时，还要同时经受高温气流冲刷、高温化学过程、冷热疲劳损伤等的综合作用。抗高温氧化涂层主要应用于高温、高压、高热腐蚀热端部件上，如涡轮工作叶片、涡轮导向叶片等表面，以限制基体氧化、热腐蚀、合金元素贫化和热疲劳等。采用等离子喷涂的方法制备的抗高温氧化涂层主要是MCrAlY合金涂层。

MCrAlY合金涂层主要有NiCrAlY、NiCoCrAlY、NiCoCrAlYHfTa等多种涂层，该涂层经过几十年的发展已经成为最佳的抗高温氧化合金涂层，主要用于高温合金的高温防护，使用温度可达到1 100℃以上。表5.3-24为采用真空等离子喷涂工艺制备的MCrAlY合金涂层的性能。

表5.3-24 真空等离子喷涂工艺制备的MCrAlY合金涂层的性能

项目	试验条件	数据
工作温度	—	1 150℃
硬度	—	30～35HRC
结合强度	—	>95 MPa
气孔率	—	<1%
抗氧化性	1 100℃，200 h	完全抗氧化

（2）耐磨涂层

耐磨涂层是为了提高零件的耐磨性能而喷涂于基体表面以降低摩擦损耗的涂层。该类涂层一般具有高硬度、高强度、高韧性和良好的润滑性能等，适用于有相对运动的零件，如阀门、柱塞、叶片等。

（3）耐撞击磨损涂层

撞击磨损是一种高负荷的磨损，一般在两个接触面之间还存在高频振动和相对移动，因此该类涂层必须具有极高的硬度、良好的韧性和结合强度，并具有一定的耐温能力。目前，常用的耐撞击磨损涂层主要有碳化钨/钴涂层、碳化铬/镍铬涂层、钴铬钨涂层等。

1）碳化钨/钴涂层　碳化钨/钴涂层是一种硬质合金涂层。碳化钨/钴涂层中的钴含量在10%～20%之间，涂层的组织以WC相为主，其使用温度在540℃以下，具有良好的抗冲击性、韧性和硬度，且涂层较为致密，与基体结合牢固。目前该涂层已经广泛应用在航空发动机的风扇叶片阻尼台、压气机叶片阻尼台、叶片叶冠阻尼面等处。

2）碳化铬/镍铬涂层　碳化铬是一种高硬度的碳化物，具有良好的耐磨损性和抗高温氧化性。

3）钴铬钨涂层

（4）耐微动磨损涂层

耐微动磨损涂层是涂覆于零件表面上以承受周期性应力，减少或消除零件蠕动磨损或表面疲劳损伤的涂层，其应该具有低应力和低收缩力、良好的韧性和结合强度、在使用温度下具有一定的抗氧化和抗腐蚀等的能力。采用等离子喷涂工艺制备的的耐微动磨损涂层主要有铝青铜、铜镍合金、铜镍铟合金、碳化钨/钴等，目前它们已经广泛应用于航空发动机上的风扇叶片榫头、压气叶片榫头、涡轮叶片榫头、整流叶片安装边、涡轮导向叶片安装边等的涂层。

（5）耐粘着磨损涂层

粘着磨损是相对运动的接触面之间因接触应力过大，接触点发生咬合，而后又由于相对运动而分离时发生的零件材料从一个表面转移到另一个表面的磨损现象。耐粘着磨损涂层是涂覆于零件表面以减少或阻止基体粘着磨损损伤的涂层。粘着磨损容易发生在相同或相似的金属之间，而当两接触面的硬度相差较大时则不易发生，因此，耐粘着磨损涂层主要分为软涂层和硬涂层。采用等离子喷涂工艺制备的软表面涂层主要包括不锈钢、钼基合金等，硬涂层主要包括氧化铬、氧化铝/氧化钛、碳化钨/钴等。目前这些耐粘着磨损涂层主要用于涡轮轴、主悬翼轴、齿轮轴、汽车活塞环等。

（6）耐磨粒磨损涂层

耐磨粒磨损涂层是指涂覆于零件表面上以防止沿零件表面运动的硬质颗粒对零件表面造成磨粒磨损的涂层。采用等离子喷涂的方法制备的耐磨粒磨损涂层主要包括氧化物、碳化物涂层。氧化物涂层主要包括氧化铬、氧化铝/氧化钛涂层，氧化铬涂层具有耐磨和耐化学腐蚀的特点，涂层经过封孔处理后，可以应用于石化工业的柱塞、轴套、迷宫环等，氧化铝/氧化钛涂层主要应用于化纤工业的罗拉、导丝钩、槽筒等，不仅抗纤维摩擦而且抗化纤中氧化钛添加剂的磨损。碳化物涂层主要是碳化钨/钴涂层，该涂层具有优异的耐磨粒磨损性能。

（7）封严涂层

封严涂层也称为间隙控制涂层或密封涂层，是用来控制机械部件运转间隙的涂层，如用于涡轮喷气发动机压气机机匣、涡轮外环内壁和导向叶片等气体流路密封处，以减少气体泄露、降低油耗，提高发动机效率。封严涂层分为可磨耗涂层和磨料涂层两种，前者硬度较低，后者硬度较高。发动机运转时，可磨耗涂层本身多余部分被磨掉，磨料涂层则磨去对偶部位，以此来控制运转间隙。

1）可磨耗封严涂层　采用等离子喷涂的工艺制备的可磨耗封严涂层主要有聚苯酯/铝硅、NiCrAl/硅藻土、氧化锆/氧化钇等。表5.3-25为聚苯酯/铝硅和氧化锆/氧化钇涂层的性能。

2）磨料封严涂层　磨料封严涂层主要应用于高转速、高负荷场合，对磨料涂层的特性要求主要有硬度高、粗糙度低、结合强度好、热导率低等，采用等离子喷涂制备的磨料涂层主要有氧化铝/氧化钛、碳化铬/镍铬等，其中氧化铝/



表 5.3-25 聚苯酯/铝硅和氧化锆/氧化钇涂层的性能

项目	聚苯酯/铝硅	氧化锆/氧化钇
工作温度	350℃以下	1 000℃以上
硬度	HR15Y = 45 ~ 75	HR45Y = 40 ~ 70
结合强度	6 ~ 8 MPa	10 ~ 15 MPa
热振次数	15 次以上（300 ~ -40℃）	50 次以上（1 100 ~ 1 00℃）

氧化钛的使用温度为 1 000℃，硬度为 50HRC，主要用于封严箅齿，叶片叶尖端面等处。

（8）热障涂层

热障涂层又称隔热涂层，是指高熔点、低热导率的涂层，主要用来阻止高温、高热燃气对基体金属的影响，提高其使用温度和寿命。热障涂层的使用温度越高，其隔热效果越明显。采用等离子喷涂工艺制备的热障涂层主要有氧化铝及各种稳定剂稳定的氧化锆，这些涂层呈层状结构，含有各种亚稳相和气孔、裂纹等，其气孔率通常为 8% ~ 15%，这些气孔的存在不仅降低了涂层的热传导能力，而且松弛了涂层内部的应力，阻止了涂层中裂纹的进一步开裂，从而保证了涂层的使用寿命。热障涂层在使用时一般采用 NiCr、NiAl 或 MCrAlY 等作为喷涂底层，起到抗氧化和增强涂层结合强度的作用。纯氧化铝涂层为白色，在高温下使用时会发生相变并有体积变化，为提高其韧性，有时会添加一定量的氧化钛。氧化锆熔点为 2 700 ~ 2 850℃，热导率低，是一种优良的耐热和隔热材料，是目前制备热障涂层最重要的材料。但纯氧化锆在高温下使用时会发生晶型变化，相应的引起体积变化，所以用纯氧化锆制备的涂层可能因内部的热应力和体积应力而导致涂层开裂或剥落，所以，目前使用的氧化锆粉末都是包含有各种稳定剂，如氧化钙、氧化镁或氧化钇等，其中氧化钇稳定的氧化锆具有最好的化学稳定性和热稳定性，工作温度可达 1 650℃以上，是目前最理想的热障涂层材料。表 5.3-26 为氧化铝涂层和氧化锆涂层的性能。

表 5.3-26 氧化铝涂层和氧化锆涂层的性能

项目	氧化铝	氧化锆
涂层厚度	0.35 ~ 0.5 mm	0.3 ~ 0.65 mm
隔热性能（测定温度 1 200℃）	热导率 λ = 5.275 W/（m·℃）	热导率 λ = 2.052 W/（m·℃）
隔热温度（发动机加力筒体试车测定，800 ~ 900℃）	40 ~ 60℃	40 ~ 60℃
孔隙率/%	3 ~ 10	4 ~ 10
热振性能	5 次以上（1 200 ~ 20℃）	5 次以上（700 ~ 20℃）
结合强度	10 MPa	8 ~ 12 MPa

编写：武洪臣（北京航空制造工程研究所）
马国佳（北京航空制造工程研究所）
张东辉（北京航空制造工程研究所）
叶云霞（北京航空制造工程研究所）
徐云宁（北京航空制造工程研究所）
周建明（北京航空制造工程研究所）



第 4 章　磨料水射流加工

1　简介

磨料水射流加工的英文是 Abrasive Water Jet Machining，所以简称为 AWJ 加工，它是新发展起来的特种加工技术之一。1983 年首次报道了世界上第一台商用磨料水射流玻璃切割系统。由于磨料水射流加工技术比其他切割技术有许多优点，例如，无切割热变形、可以切割任何材料、切割方向的高柔性和很小的切削力等，正在被广泛用于难加工材料（例如：陶瓷，增强型复合材料和钛合金等）的加工中。除了切割材料的广泛性以外，磨料水射流加工方法还在技术性能上和经济实用性方面有突出的特点，因此磨料水射流加工技术具有良好持续的发展前景。

1.1　磨料水射流加工系统

一套磨料水射流加工系统由下列部分组成，见图 5.4-1。水处理单元、水泵、高压增压器、水射流发生系统、磨料供给系统及辅助元件，例如管路、控制阀等；有喷嘴运动执行装置、机械手、三坐标工作台等；还有在工作台下起支撑、阻尼、缓冲和回收水射流的水箱；以及必要的观察、检验工具和安全、保护设施等。

根据流体介质分类，射流可以是纯水射流、可溶添加剂水射流和不溶磨料水射流。纯水高压射流一般用来切割软质材料。根据它们的产生和添加磨料的方式，磨料水射流可以再分为下列两种。

a. 间接混合系统：在传输磨料水射流系统中，一般有两级喷嘴，第一级喷嘴称之为形成水射流喷嘴，第二级喷嘴称之为混合、加速水射流喷嘴。一级喷嘴被用来形成水射流，即从高压水到水射流的转换。二级喷嘴被用来连接混合腔实现磨料与水射流混合，然后加速和喷出用于加工的磨料水射流，见图 5.4-2。这类磨料水射流传输系统的优点是结构简单、装置实用；缺点是喷嘴容易磨损以及磨料与水射流混合不均匀，因而影响磨料水射流的切割性能。所以该装置适用于普通的尺寸、结构和精度加工。

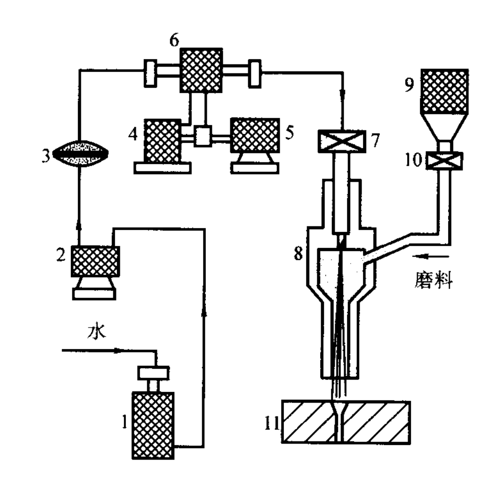
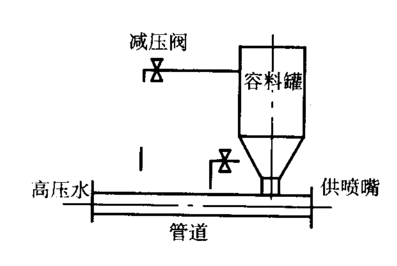


图 5.4-1　磨料水射流传输系统示意图

1—水处理单元；2—调压泵；3—过滤器；4—储油器；5—液压泵；6—水压倍增器；7—开关阀；8—喷嘴；9—磨料供给系统；10—磨料计量阀；11—工件

b. 直接泵压系统：在直接泵压的磨料水射流系统中，与上述系统的主要区别是磨料与水射流的混合方式不同。该系统采用磨料在使用前与水混合成稀浆。因此直接泵压系统的优点是磨料与水射流混合均匀；缺点是增加用前混合装置和容易引起系统的磨料磨损，因此该装置主要适用于切割性能要求较高的以及相对压力较低的加工。

图 5.4-2 表示的是磨料水射流系统的切割头组成和水射流的形成基本原理。形成水射流的一级水喷嘴直径一般为 0.1 mm 的尺寸量级，将高压水转换成一束高速的水射流。高速射流产生的真空或负压把磨料供给系统提供的磨料吸入混合腔并与水射流混合后送入聚流，加速的二级喷嘴。一部分射流的动能传递给磨料，磨料的速度迅速增加，结果可获得一束喷出二级喷嘴的高速、聚流磨料水射流，整个过程形成一束磨料水射流。



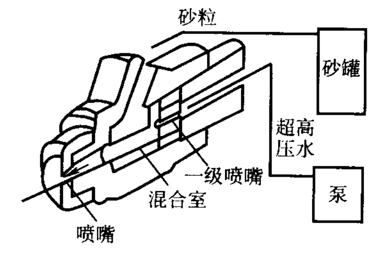


图 5.4-2　磨料水射流加工系统示意图

1.2　分类及特点

1）水射流分类　高速水流包括若干种水射流的类型，归纳起来大致可分为如表 5.4-1 所示的各种类型。其中，存在着不同的界限或标准，从技术上讲定义一个临界压力来区分低压与高压射流都是不容易的。有专家建议靠柱塞泵产生的射流可定义为低压射流；反过来，靠液压驱动的水压倍增器产生的射流可定义为高压射流，所以这里对射流类型的划分仅供参考。随着技术的发展，原来定义的高压范围可能逐渐成为低压的范围，比如新研制出的商用柱塞泵产生的水压 $P = 270$ MPa，达到了水压倍增器的压力范围等。图 5.4-3 给出磨料水射流应用的典型水压倍增器示意图。

表 5.4-1　水射流分类

注入式水射流		
低压射流 高压射流	连续射流 不连续射流	纯水射流 添加剂水射流 磨料水射流
低压—270 MPa 高压—400 MPa	不连续射流 单次冲击 多次冲击	磨料水射流 三相射流（注入式） 二相射流（悬浮式）

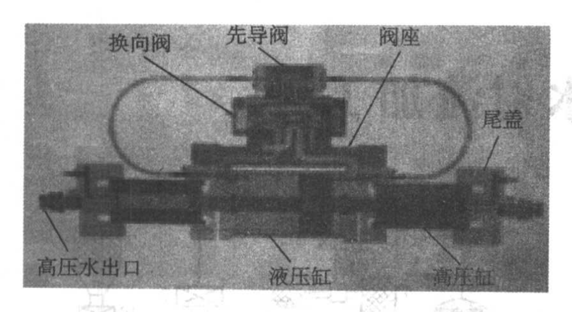


图 5.4-3 典型水压倍增器示意图

相对于加工对象系统，一般可分为连续射流和不连续射流。在不连续冲击载荷情况下，将其定义为不连续射流。但是也有专家指出，每种射流在冲击加工对象过程中都会产生不连续相，原因是压力波动和射流的过渡。因此建议把由于外因引起的不连续射流与加工区自身原因引起的射流波动分开；而连续射流自然是不受外部条件影响的情况，表 5.4-1 同时给出不连续射流系统的情况。

根据射流介质分类，一般又可分为纯水射流、添加剂水射流和磨料水射流。有报道研究试图把添加剂和磨料混合起来加入水射流中，分析其射流性质与加工效果，这是值得注意和进一步研究的课题。磨料水射流的进一步划分要依据其产生和它的成分组成。表 5.4-1 还表示出注入式水射流和悬浮式水射流的情况。注入式水射流包括水、磨料和空气，因而称其为三相射流。与其对比，悬浮式水射流不包含空气，因此是二相射流。在机械制造领域应用的主要是注入式磨料水射流。

2）磨料水射流加工特点　与其他传统的及非传统的加工方法相比，磨料水射流加工技术有以下优点。

① 高的加工通用性　可以切削任何材料，特别是加工许多难加工材料，例如，塑性材料：淬火钢，钛合金，铜及铜合金，铝合金；脆性材料：玻璃，陶瓷和石英等。

② 可加工各种形状　磨料水射流不仅能进行二维加工，而且还能进行复杂形状的三维成形等。

③ 几乎无切削热产生　因为磨料水射流产生的切削热被水流迅速带走，所以，在工件上几乎不产生温升，适合于切削热敏感材料和与其类似的材料，这特别适合于过热可能改变材料性质的应用场合。

④ 切削力小，装置简单　多数情况下，由于水射流机械切削力小，加工平板材料时可以直接将其置于工作台上而无需夹持，因而，无需更换工装夹具，即无需更换工具的编程和无需物理上的多种工具。

⑤ 环境友好　磨料水射流切割不产生有害灰尘，它是环境友好的加工手段之一，因此许多磨料水射流系统用于食品工业。

⑥ 有效性　当水作为工作流体，常见的磨料有石榴石、矿砂等成本低的材料，其加工适用范围广。

虽然磨料水射流加工有许多突出优于其他方法的优点，但也存在某些加工方面的局限性。

① 高的一次投入成本和运行成本　据估计磨料水射流一次投入需 5~50 万美元。运行和维护成本需 10~30 美元/h，使磨料水射流加工费用高于其他形式的非传统加工成本，如等离子、激光。

② 磨料水射流切割的噪声大　切割过程包含有机械，空气动力噪声。机械来源于电机和高压泵；空气动力噪声来自高速射流的形成和传输，特别是当悬距较大时和射流冲击回收水箱时，有潜在的噪声产生。

③ 有限的加工能力　磨料水射流切割厚度有限，如果工件太厚，射流没有能力切透工件，将在底部产生二次加工。磨料水射流和其他射流加工一样，产生切割锥角，例如切口壁相互不平行，形成几何误差。

④ 喷嘴磨损　磨料水射流喷嘴是决定磨料水射流系统技术和经济性能的关键部件之一，与加工过程一样也受到不断的磨损。当磨料水射流喷嘴磨损增大时，磨料粒子与高速水流的混合不均匀，因而导致切削能力的降低。

⑤ 较低的表面质量，较低的工件几何精度　常用的硬质合金喷嘴在 240 MPa 运行压力下，4 h 磨损。有许多因素影响喷嘴磨损，实验结果表明，用 80# 石榴石矿砂作磨料在不同切割条件下喷嘴寿命 20~30 h（机动时间），所以，喷嘴磨损是导致水射流加工质量不高的重要因素。

1.3 应用领域

（1）磨料水射流加工应用领域

由于磨料水射流的技术和经济特点，该技术有许多潜在的应用，许多企业可以从这项先进技术受益。过去几十年，磨料水射流已被广泛应用于各个行业。例如，建筑行业中的切割金属和混凝土框架；煤矿开采业中的辅助开采；食品行业中的切割食品和脱脂及其清洗污垢。作为制造技术，磨料水射流已被广泛应用，例如机械制造、机动车辆、玻璃、航空等，特别适用于难加工材料如，陶瓷、大理石、涂层复合材料、叠层玻璃，钛合金板。磨料水射流切割在某些方面已成为优于其他技术的有效手段。

（2）磨料水射流加工应用方式

1）磨料水射流铣削　包括多次走刀成形和掩模刻蚀图案两种成形原理。

2）磨料水射流车削　包括车削外圆和螺纹类型。

3）磨料水射流穿孔　包括水流冲击，穿透和保压三种作用形式。

4）磨料水射流抛光　包括直线倾角式，曲线式和径向式三种相对运动关系。

5）磨料水射流强化　包括冲击和冷热交替两种作用形式。

6）磨料水射流切割　包括平板，曲线轮廓，锥度和复杂形状等多种类型。

2 磨料水射流加工技术基础

2.1 磨料水射流加工原理

磨料水射流加工是以高速水流为载体带动高速的和集中的磨料流冲击被加工表面，实现对材料有规律和控制的去除过程。它不同于传统的喷砂过程，因为磨料水射流的磨粒尺寸更细，对加工性能和加工参数控制的更加准确。其基本原理是利用液压系统把水压增加到 200~400 MPa，使高压水通过一个专门设计的一级水喷嘴（直径 0.1~0.6 mm）或称前级喷嘴，形成 2~3 倍音速的高速水射流，冲击待加工表面从而去除材料。按照水中是否混有磨料，分为纯水射流（WJ）和磨料水射流（AWJ）加工两种类型。前者主要用于软的非金属材料的切割等，后者依照磨料和水的混合方式的不同又分为前混合式和后混合式两种。前混合式是将磨料和水在管道中混合均匀后，送到喷嘴进行加工。这种方式由于磨料吸收能量充分，因而切割性能好，所需工作压力低（50~250 MPa）。后混合式是将磨料输送到一级水喷嘴后的混合腔入口，利用水射流的高速负压作用将磨料吸入混合腔，磨料经过混合和加速后喷出喷嘴。由于磨料进入混合腔时间短，磨料吸收射流的能量不充分，因而切割性能较低，所需工作压力高（200~400 MPa），目前磨料水射流加工应用以后混合式为主。主要应用在金属材料，复合材料等用常规方法不能加工或难加工材料的场合；磨料水射流特别适用于硬脆材

料，例如，锗、硅、云母、陶瓷等微电子产品的原材料加工以及玻璃和大理石等建筑材料的加工，加工原理如图 5.4-4 所示。

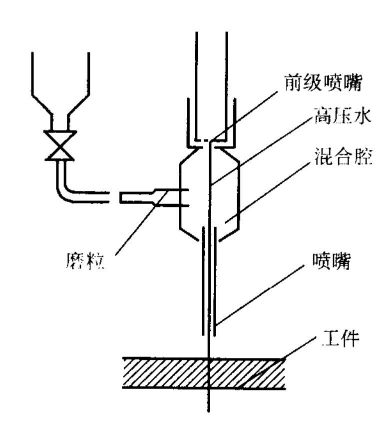


图 5.4-4　磨料水射流加工原理示意图

2.2　材料的去除机理

磨料水射流切割中材料去除可分为两类，微观机理与宏观机理。前者指的是单个粒子去除机理，而后者主要指切口的形成过程。

2.2.1　单个粒子磨蚀机理

总体上，磨料水射流切割被认为是磨粒在材料表面蚀除作用的微去除过程。固体颗粒的冲击是材料去除的基本作用。与传统的磨料加工（如磨削）过程相比，磨料水射流采用悬浮粒子，它的位置不规则变化，粒子可能有直线运动，也可能有成角度的曲线运动。因此，很难描述粒子的切割过程。总之，传统的磨蚀理论按塑性材料和脆性材料两种类型进行描述。

（1）塑性材料蚀除机理

许多有意义的对塑性材料蚀除机理的研究，主要来自于美国人 Finnie 的微切削模型。Finnie 关于塑性材料蚀除分析主要是单个磨粒与材料表面相互作用的表达关系。材料去除量定义为粒子尖端的刮除量，是单纯的粒子碰撞引起的材料塑性变形的结果。粒子以冲击角 α 沿着粒子轨迹冲击材料表面，见图 5.4-5。该冲击产生的材料塑性变形或切削作用认为是粒子交替或当粒子水平运动交替地冲击靶材或当粒子尖端剥离材料表面的切削作用。

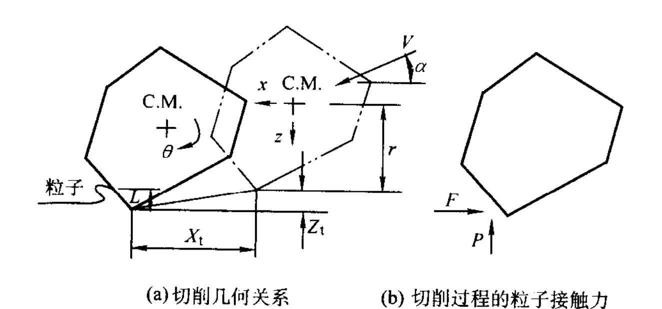


图 5.4-5　粒子蚀除塑性材料的二维切入几何模型

为表示粒子去除材料，假设硬的带棱角的粒子以 α 角冲击光滑表面（图 5.4-5a），切入表面就像一把锋利的刀具。对于单个粒子去除材料用 Q 表示，分小角度和大角度两种冲击形式，其数学表达式分别为：

$$Q=\frac{m_p V_a^2}{\psi\sigma\varphi}\left(\sin 2\alpha-\frac{6}{\varphi}\sin^2\alpha\right)\qquad \tan\alpha\leqslant\psi/16 \tag{5.4-1}$$

$$Q=\frac{m_p V_a^2}{\psi\sigma\varphi}\left(\frac{\varphi\cos^2\alpha}{6}\right)\qquad \tan\alpha\geqslant\psi/16 \tag{5.4-2}$$

式中，m_p 是粒子质量；V_a 是磨粒速度；α 为粒子冲击角度；σ 是靶材屈服强度；ψ 为垂直力与水平力之比，$\varphi\approx 2$。前面 4 项采用标准国际单位，则 Q 单位为 mm^3/s。

这个模型对于描述粒子冲击引起材料屈服变形的关系和影响存在不足。当粒子以大角度冲击材料的模式作用，即 α 接近 90°时，Finnie 的上述分析计算粒子速度指数是通过做更接近实际假设，关于粒子与材料表面相互作用导出粒子速度指数从 2 增加至 2.5。这项研究对 Finnie 的理论提供了有力支持，特别是粒子的小角度冲击角的情况［采用式（5.4-1)］。

1）切削变形　荷兰人 Bitter 从实验研究与分析中提出塑性材料蚀除机理，其中包括两种磨蚀机理：第一种变形磨蚀是由于磨粒在碰撞过程中重复变形引起的，导致材料最终的脱落去除。第二种切削磨蚀是由于自由移动粒子切削作用引起的。变形磨蚀实际上是粒子速度方向垂直于材料表面的作用，而粒子速度方向在平行材料表面方向决定了切削磨蚀的作用。两种磨蚀机理同时存在的情况下，Bitter 推导材料去除的两个方程，总去除量是两部分之和，其变形磨蚀材料去除量由下式计算：

$$Q_{dw}=\frac{m_p\ (V_a\sin\alpha-V_c)}{2\varepsilon_d} \tag{5.4-3}$$

式中，ε_d 是变形磨蚀系数；V_c 是粒子能够去除材料的临界速度。

同样，切削磨蚀材料去除量由下式计算：

$$Q_{cw}=\frac{m_p V_a^2\cos^{2\alpha}-C\ (V_a\sin\alpha-V_c)^{3/2}}{2\varepsilon_c} \tag{5.4-4}$$

式中，ε_c 是切削磨蚀系数；C 为经验计算系数。

2）沟犁变形　基于扫描电镜观察，在美国工作的 Hutching 介绍了固体粒子蚀除微观切削过程，他认为不规则粒子冲击可以分为两种模式，一种是沟犁变形，一种是切削变形，见图 5.4-6，前者的模式是当粒子形状呈球形或不规则粒子的圆形部分冲击材料，以大的负前角作用产生材料去除。相反，切削变形明显是带棱角的粒子即正前角锋利切削刃的材料去除。Hutching 进一步依据粒子转动模型把切削变形模式分为两种类型，见图 5.4-6，当粒子向前转动，一个明显的刀具切削痕形成（Ⅰ型切削），而粒子向后转动产生碎屑去除（Ⅱ型切削）。观察还表明，尽管两种作用的大小难以确定，但可以确定切削变形和沟犁变形两种磨蚀同时作用。

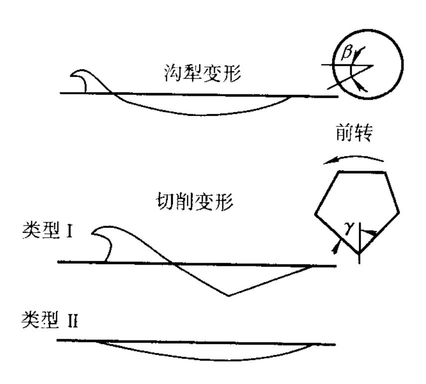


图 5.4-6　粒子两种变形作用原理图

（2）脆性材料去除机理

已发现脆性材料磨蚀机理与塑性材料有很大差异，一般认为脆性材料的材料去除过程是磨料冲击产生裂纹、扩展及粒子冲击产生的微观裂纹的相互作用过程，其磨蚀机理可分为三种类型。

锥形裂纹，基于材料蚀除的产生完全是由于裂纹扩展和形成碎屑的假设。

横向裂纹，基于塑性变形对裂纹的形成和表面碎屑形成作用的假设。

晶界裂纹，基于冲击粒子产生的破坏是由于晶粒边界裂纹造成的假设。

1）锥形裂纹　典型的锥形裂纹蚀除机理由 Sheldon 和 Finnie 提出的，建立在材料去除完全是由裂纹扩展和形成碎屑的基础上，假设材料蚀除是由于粒子冲击大小超过了 Hertzian 接触强度的结果。因此，相关模型被称之为 Hertzian 锥形裂纹模型。其中应力产生裂纹在靶材表面扩展到材料内部固有的裂纹。其产生裂纹扩展的载荷与表面裂纹分布有关，根据威布尔统计算法，每个冲击去除量与粒子穿透深度和产生裂纹的大小成正比。材料去除量表达式根据粒子的径向尺寸 R，冲击速度为 V_a，威布尔常数为 m，关系式如下：

$$Q = K_1 R^a V_a^b \tag{5.4-5}$$

式中，Q，R，V_a 均为标准国际单位，K_1 为常数，由靶材及粒子材料实验确定；指数 a，b 分别为

$a = 3(m-0.67)/(m-2)$　（圆形粒子）

$a = 3.6(m-0.67)/(m-2)$　（棱角形粒子）

$b = 2.4(m-0.67)/(m-2)$　（圆形粒子和棱角形粒子）

尽管锥形裂纹提供了对于脆性材料蚀除的数学描述，它的物理基础是根据 Hertzian 裂纹形成假设提出的，前提是横向裂纹形成是材料去除的主要原因的应用场合。

2）横向裂纹　美国人 Evens 根据实验裂纹行为解释了单个粒子冲击的蚀除过程，并在建立材料蚀除模型同时考虑了横向裂纹的形成，假设材料去除率与每个粒子冲击去除量成正比，通过单个粒子冲击去除材料用横向裂纹深度及其半径 C_1 表示，如图 5.4-7 所示，计算关系式如下：

$$Q \propto V_a^{19/6} R^{11/3} \rho_p^{19/12} K_c^{-4/3} H^{-1/4} \tag{5.4-6}$$

式中，ρ_p 为粒子密度；K_c 为临界应力集中系数；H 为靶材硬度；均为标准国际单位。

美国人 Wiederhorn 基于弹－塑性理论提出了横向裂纹模型，在确定材料去除率时，假设横向裂纹尺寸与裂纹径向尺寸成正比，以及横向裂纹深度与粒子最大穿透量成正比，计算关系式如下：

$$Q \propto V_a^{22/6} R^{11/3} \rho_p^{11/9} K_c^{-4/3} H^{-1/9} \tag{5.4-7}$$

式（5.4-7）与式（5.4-6）比较可以看出，对去除量的影响因素完全一致，区别之处仅在于指数值大小的不同，原因主要是由于假定条件的不同。

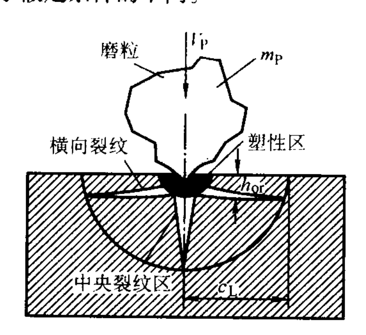


图 5.4-7　脆性材料横向裂纹几何模型

3）晶界裂纹　通过假设冲击粒子产生的破坏是由于晶粒边界裂纹造成的，美国人 J.E.Ritter 提出了晶粒间的裂纹蚀除机理用于材料去除和建立相关模型，以这个机理为前提，材料表面的凹坑伴随的能量为粒子边界裂纹能量乘以冲击每个凹坑的粒子数，再乘以每个粒子表面积。这里每个粒子表面积与平均粒子直径成正比，凹坑尺寸与粒子运动能量成正比，每次冲击材料去除量是由凹坑直径立体体积得到的，最终的单个粒子材料去除量计算关系式如下：

$$Q \propto \frac{dEK_e}{K_c^2} \tag{5.4-8}$$

式中，E 为靶材的弹性模量；d 为粒子平均直径；K_e 为粒子能量系数；K_c 为临界应力集中系数。

2.2.2　切口形成过程

材料去除过程（或者切口形成过程）的机理被广泛接受的理论是由在美国工作 Hashish 提出的，他开展的磨料水射流加工过程研究是采用高速摄影记录粒子冲击光学玻璃样品的材料去除过程，他发现在射流流过的方向材料的去除过程是一个交替的穿透过程，它由两部分切削形态和区域组成，称之为切削磨蚀区和变形磨蚀区，符合 Bitter 的蚀除理论。Hashish 还指出根据粒子在射流横向上与材料相互作用，切削过程由三个阶段组成，切削进入阶段，交替切削阶段和切削出口阶段。

1）分步成形和切割区域　Hashish 用高速摄影观察研究透明光学玻璃样品时发现在射流与工件材料的稳定界面，存在有从切口上部到深度 h_c 的光滑切口形态（见图 5.4-8），

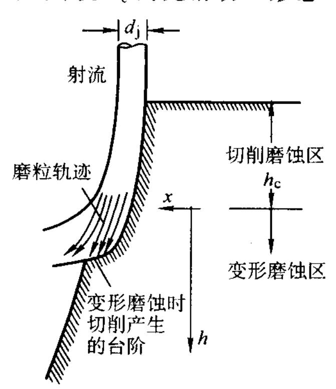


图 5.4-8　切削磨蚀与变形磨蚀几何模型

低于这部分，在材料切口表面上分台阶形成，并呈现射流向下冲击直到射流达到最深处 h。切口前沿曲面在 h_c 处突然变化，产生一种材料去除模式到另一种模式的转换。Hashish 提出该区域至 h_c 处为切削磨蚀区。磨粒相对于局部切口前沿形状以小角度冲击材料表面。在这个区域里，材料去除主要由微切削过程作用，稳定加工过程中材料去除率与射流材料切削率相等。

当切削去除磨蚀区达到深度 h_c 时，开始形成台阶，然后射流穿透材料。从台阶开始随深度的增加材料去除速度下降，确定这个区域为变形去除区，该区粒子以大角度冲击材料，由于大量粒子的碰撞引起材料的塑性变形和裂纹变形。

提出台阶形成机理为沿深度方向的材料去除过程，当磨料粒子以 0°角冲击局部材料表面时，虽然无材料去除，但是，由于连续的射流横向移动形成小的台阶。这些小台阶的形成导致切口曲线及冲击角的急剧变化，在这个阶段粒子冲击垂直于小台阶，材料去除可以被看作是脆性变形的蚀除过程。

基于 Hashish 的研究，美国人 Momber 从射流的体积力的观点描述小台阶形成现象，在材料去除的初期，射流冲击工作表面平行于射流轴线，随着切深的增加，局部冲击角增大，由于较高的体积力，磨粒不可能在水流方向急剧变化，



分离过程产生，这个过程导致粒子冲击的局部积累，结果形成局部小台阶。台阶形状随材料去除过程不断变化，直到形成临界形状。该临界形状以 90°冲击角为特征，随后材料去除过程变成钻孔过程。当磨料不能去除更多材料时，磨料水射流的切削进入最后阶段。与 Hashish 的工作不同，在美工作的韩国人 Zeng and Kim 建立了另外两阶段的切削模型，见图 5.4-9。前一个阶段为大角度冲击，为水流冲击覆盖切削前沿上部的直接冲击，此后反射水流产生二次周期性冲击，称第一阶段为直接冲击区。这部分磨粒直接冲击整个切削前沿，随水流进入材料，磨料水射流背面形成磨粒反射的二次冲击。它导致切削前沿曲面突变，全部切削前沿由若干个重复的小台阶组成，其重要特征是完全切削过程与磨粒冲击掠射角有关（这里没有考虑靶材材料和类型）。

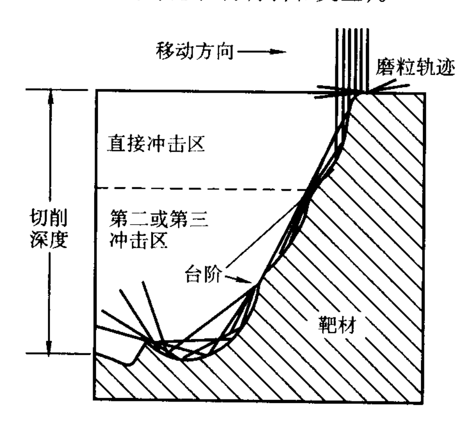


图 5.4-9　二阶段冲击区模型

2）切削加工过程　已有报道关于沿水流移动方向观察切削过程的研究结果，最有代表性的是 Hashish 的研究工作。描述了透明材料如玻璃，聚酯和光学玻璃的观察研究，并介绍了沿射流移动方向进行切削的三个阶段：入口阶段，切削阶段和出口阶段，如图 5.4-10 所示。

入口阶段，射流冲击材料进入工件导致深度增加，在这初始阶段，材料的去除是由粒子的小角度冲击实现的，随着切深的增加，粒子的冲击角随之增大。当切削深度达到 h 时，穿透过程完全由大角度冲击完成。

切削阶段，该段区域为稳定状态的切削磨蚀区域，低于转折点台阶面的局部通过粒子的大角度冲击，台阶面下移，这种交替切削过程持续到射流达到材料的最终切削深度。

出口阶段，当射流逼近工件出口边缘时，非切削三角区形成，它与射流向前反射有关，表明切削磨蚀区达到了出口阶段。

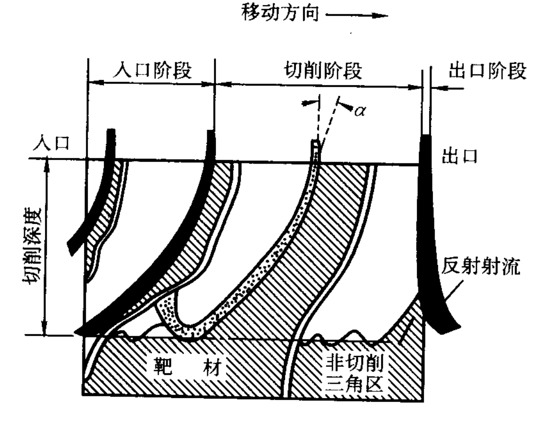


图 5.4-10　三阶段切削过程模型

2.3　切口性能

与其他射流切削技术相比，磨料水射流加工产生的切口有某些特殊性质，图 5.4-11 表示的是磨料水射流产生的典型切口形式。总体上，切口有较宽的入口宽度，而宽度随射流切入材料逐渐减小，所以形成切口锥角。由于射流的扩散冲击和碰撞在切口的上缘产生材料的塑性变形，形成上边缘的小圆角或称边缘塌边。磨料水射流的切割时间越长，上边缘的小圆角越明显。切割塑性材料比切割脆性材料时的圆角更明显。同时在切割塑性材料时，容易产生毛刺，这是由于磨粒冲击使出口边缘的材料塑性变形导致材料翻边的结果。

磨料水射流加工出的表面有两段明显不同的区域，见图 5.4-11。一段为上部的光滑区，用表面粗糙度评价，并用光滑区切深来表示深度。另一段较低部分为纹路区，这段以波纹为重要特征。射流穿透量指的是总的切深。在多次切割情况下，射流移动和多次切割同一切口，射流总穿透量为各次切割形成的切深总和。波纹在切口表面呈现拖后的滞后角，这个角随切深增加而增大。

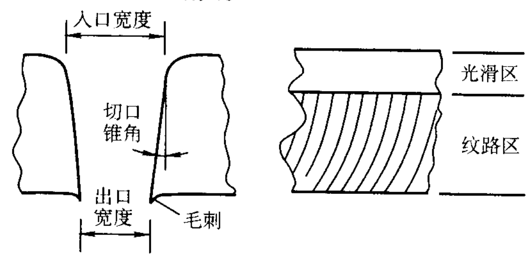


图 5.4-11　通切口形状示意图

当射流不能切透材料时，一个大的“袋”状区域在切口底部形成，见图 5.4-12。美籍华人 Chen 等把切口分为三个区，前两个区具有通口切出的特征，第三个区域为在不同切深底部形成一个由窄变宽的“袋”状不规则区。

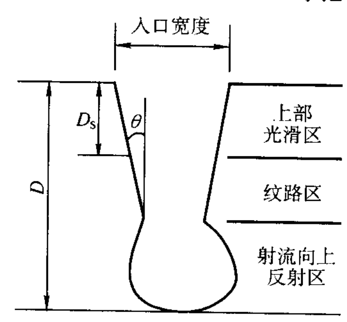


图 5.4-12　不通切口形状示意图

基于粒子蚀除机理认为在前两个区切削机理分别为切削磨蚀和变形磨蚀，而在第三个区，切削过程是由粒子大角度冲击和射流向上反射形成的蚀除磨蚀。总而言之，发现随水压力和磨料流量的增加以及射流移动速度和悬距的降低，导致切深增加、光滑切深增加、切口锥角减小和粗糙度降低，还发现水压和射流移动速度对切深影响和对光滑切深的影响比磨料流量与悬距的影响更大。

2.4　切割性能数学模型

磨料水射流切割技术被工业广泛应用的同时，缺少适合各种切割性能评价的预测模型，该模型在加工计划中应以优化加工参数的理论为基础。缺少数学模型的主要原因是，磨料水射流的加工过程和状态十分复杂，许多因素还需进一步研究。在综述文献中已报道了若干数学模型，基于回归分析和专门用途的实验数据分析。最有代表性的是用蚀除理论建立的模型，其他包括采用裂纹机制和能量守恒的模型。

2.4.1 切深模型

（1）基于蚀除理论

不同材料的蚀除对应不同的蚀除机理，所以数学模型的建立分别为塑性材料和脆性材料两种模型。

1）塑性材料　根据磨料水射流切割加工的实验观察，切削机理对于上部光滑切割区和下部纹路区可以被看作切削磨蚀和变形磨蚀，对应的两个区域为切削区和变形区。基于Finnie干蚀除磨蚀模型，建立切削去除和变形去除的切深模型，表达式分别为：

$$D_1 = \frac{Cm_a V_a^2 \alpha_0}{4\sigma_f d_j V} \tag{5.4-9}$$

$$D_2 = \frac{2(1-C)\ m_a V_a^2}{\pi d_j \varepsilon V} \tag{5.4-10}$$

式中，C 为常数；m_a 为磨料质量流量；V_a 为粒子速度；V 为射流移动速度；α_0 为粒子对材料表面的冲击角；d_j 是射流直径；σ_f 为材料拉伸强度；ε 为变形去除单位体积材料所需的能量，均为标准国际单位。总切深等于 D_1 与 D_2 之和(mm)，该模型估计与大多数实验结果一致。由于公式中并没有包含所有加工参数，也没有包括粒子尺寸，因此，Hashish和Finnie提出改进模型如下：

$$D_1 = \frac{V_0 / C_k d_j}{\left(\frac{\pi \rho_p V d_j^2}{14 m_a}\right)^{0.4} + \frac{V_c}{C_k}} \tag{5.4-11}$$

$$D_2 = \frac{1}{\frac{\pi d_j \sigma V}{2C_1 m_a (V_0 - V_c)^2} + \frac{C_f V_0}{d_j (V_0 - V_c)}} \tag{5.4-12}$$

式中，C_1 为常数；σ 为材料屈服强度；V_c 为粒子去除材料的阈值速度；C_f 是粒子与切口壁的摩擦系数；ρ_p 是粒子密度；V_0 是粒子初速度；C_k 为综合反映粒子与材料的特性系数，均为标准国际单位。

$$C_k = \sqrt{\frac{3\sigma R_f^{0.3}}{\rho_p}} \tag{5.4-13}$$

式中，R_f 为粒子圆度系数（等于粒子的平均直径与最大内接圆直径之比）。实验表明，该模型与实验结果基本吻合，可用于生产实践。

2）脆性材料　美籍韩裔Zeng和Kim认为磨料水射流切割脆性材料的去除是由塑性变形和晶界裂纹引起的，因此提出切削过程与磨粒以小角度冲击有关。根据晶界裂纹蚀除机理采用裂纹网格模型，假设总的材料去除量是由单个粒子微加工累积的结果，得到下列切深公式：

$$D_t = \left(\frac{\eta E_V E_y}{1+r}\right)^2 \frac{E m_A p}{\rho_w d_m V}\left(\frac{2 f_w \beta d \sigma_f \alpha^2}{3\gamma E} + \frac{\alpha}{\sigma_f}\right) \tag{5.4-14}$$

式中，η 为动量传递效率；E_V 为水喷嘴效率；E_y 为可压缩性系数；r 为磨粒与水质量之比；E 为工件的弹性模量；ρ_w 为射流密度；d_m 为混合管喷嘴直径；f_w 为应力波能量有效分量比例系数；β 为工件材料的泊松比；d 为粒子尺寸；α 为粒子对材料表面冲击角；γ 为断裂能，均为标准国际单位。

（2）基于断裂机制

据报道，脆性材料蚀除过程是由裂纹的形成和扩展决定的，由于裂纹的难易程度通常被看作是裂纹扩展的尺度，所以，建立了脆性材料的两个蚀除模型用于预测切深。第一个蚀除模型基于塑性变形引起的裂纹和表面形成碎屑的假设，第二个蚀除模型基于横向裂纹的尺寸与径向裂纹的尺寸成正比以及横向裂纹深度与粒子穿透深度成正比的假设，结果得出下列切深模型：

$$D_t = C_1 \frac{f_1}{f_3^2}\left(\frac{1}{Vd_j}\right)\left(m_a V_0^{19/6} R^{2/3} \rho_p^{7/12} K_f^{-4/3} H^{-1/4}\right) \tag{5.4-15}$$

和

$$D_t = C_2 \frac{f_2}{f_3^2}\left(\frac{1}{Vd_j}\right)\left(m_a V_0^{22/9} R^{2/3} \rho_p^{2/9} K_f^{4/3} H^{1/9}\right) \tag{5.4-16}$$

式中，C_1，C_2 为常数；K_f 为材料断裂难易系数；H 为材料的维氏硬度；f_1，f_2，f_3 由下式给出：

$$f_1 = \frac{1}{6}(\sin\alpha_e \cos^5\alpha_e) + \frac{5}{24}(\sin\alpha_e \cos^3\alpha_e) + \frac{5}{32}(\sin 2\alpha_e) + \frac{5}{16}\alpha_e \tag{5.4-17}$$

$$f_2 = \frac{1}{5}(\sin\alpha_e \cos^4\alpha_e) - \frac{4}{15}(\sin^3\alpha_e) + \frac{4}{5}\sin\alpha_e \tag{5.4-18}$$

$$f_3 = \frac{1}{2\tan\alpha_e}\left\{\frac{\tan\alpha_k}{\cos\alpha_e} + \ln\left[\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_e}{2}\right)\right]\right\} \tag{5.4-19}$$

式中，α_e 为射流在工件底部的出口角；α_k 为在切削前沿处局部切口角。

实验证明，在水压200 MPa该模型给出很好的预计值。在其他水压下，预计值与实验值有较大变化，与前面建立的其他模型相比，这两个模型包含较少的要从实验中确定的附加材料特性参数。

（3）基于能量守恒法

许多用能量守恒方法建立切深模型的例子，该方法一般是假设磨料水射流的输入能量与材料的去除率成正比，即 $\frac{dQ}{dt} \propto \frac{dK_e}{dt}$。$Q$ 为材料去除量，K_e 为射流的运动能量。材料的去除量与切深，切口宽度及射流移动速度有关。通常假设只有磨粒产生材料的去除，因此射流的运动能量可以从粒子的速度和磨粒的流量数据求出。基于上述假设得到关系式如下：

$$D_t = C\frac{P - P_0}{V^{\alpha 1}} \tag{5.4-20}$$

式中，C，α_1 是实验系数；P_0 为去除材料所需的最小压力，由切削实验确定。从切削87%的氧化铝陶瓷材料实验中，建立了总切深和光滑切深分别为：

$$D_t = 0.9\left(\frac{m_a P}{V^{0.78}}\right) \tag{5.4-21}$$

$$D_s = 0.88\left(\frac{m_a P^{0.51}}{V^{0.27}}\right) \tag{5.4-22}$$

与其他建模方法相比，该方法采用相对简单的半经验公式和必要的实验确定模型中的参数，这种方法建立的模型更适合于试验材料的情况。在粒子冲击材料表面时总是存在摩擦现象，即存在摩擦损失的能量，但其状态和大小难以确定，为了简化计算，在建模过程中经常忽略由于摩擦引起的能量损失。

2.4.2 切口几何特征模型

在磨料水射流切割有机复合材料研究的锥角形成时，发现加工参数对切口锥角的影响，随着工件的厚度的变化而变化。当工件厚度小于5 mm时，切口锥角主要受悬距的影响，当工件厚度在5～10 mm时，切口锥角主要受悬距和粒子的尺寸的影响，当工件厚度大于10 mm时，悬距、粒子尺寸、水压力和射流移动速度都对切口锥角影响较大。因此，在切割小厚度充分的切割能量可以稳定切割过程，此时水压和射流移动速度的波动对切割过程无明显影响。在切割厚度大于15 mm时，单个参数对切口锥度无决定性影响，而是各个参数的综合影响。通过切口几何特征统计分析，各个切割参数对切口锥度的影响关系式如下：

$$T_a = C_0 + \sum_{i=1}^{4} C_i x_i + \sum_{i=1}^{4} C_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=i+1}^{4} C_{ij} x_i x_j \tag{5.4-23}$$

式中，T_a 为切口上部宽度（射流入口）和切口下部宽度（射流出口）对于给定材料的差值；C_0 为常数；C_i、C_{ii} 和



C_{ij}分别为第一顺序，第二顺序及相互作用顺序系数；x_1 为水压力；x_2 为磨粒粒子尺寸；x_3 为射流移动速度；x_4 为悬距。

明显地，当需要通过实验找出上述系数时，可使用该模型给出简化的切口锥度参数和关系式。其他的用于切口几何特征的模型，如切口宽度与上述关系式的建立相类似，其中多数模型是采用实验数据回归分析法建立的。

2.4.3　表面特性模型

基于理想几何关系及假定粒子以90°冲击材料表面产生变形磨蚀去除材料，Hashish 提出简化的物理波纹模型如下：

$$\frac{2R_w}{d_m} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \left(\frac{d_m\ (d_t - d_l)\ V}{0.5 m_a V_a^2/\varepsilon}\right)^2} \quad (5.4\text{-}24)$$

式中，R_w 为表面波纹度；d_m 为混合管喷嘴直径；d_l 为切割蚀除深度；m_a 为磨料质量流量；V_a 为粒子速度；d_t 为总穿透深度；ε 是变形磨蚀系数；V 为射流移动速度。

经实验验证该模型预测参数和实验结果之间的一致性较好。还有类似的表面粗糙度数学模型可以评价磨料水射流加工表面质量，这些经验或半经验公式实验条件略有不同，但采用的基本方法都是通过实验数据分析得到的，根据中线平均测量建立的模型，举例如下：

$$R_a = R_a\ (0)\ + C\ \left(\frac{h}{D_t}\right)^e \quad (5.4\text{-}25)$$

式中，R_a（0）是接近上切口处的表面粗糙度（通常在总切深的上5%处）；h 为从上切口到测量点处的距离；C 和 e 是由实验确定的常数。

3　磨料水射流性能与建模

磨料水射流的性能包括磨料性质，射流性质，切割头性质和加工对象等整个系统性质，这里主要介绍与磨料水射流加工质量和加工参数联系密切的水射流综合性能，一部分是磨料的性质；一部分是对于切割性能十分重要的射流结构和磨粒在射流中的速度与分布，以及磨料水射流喷出喷嘴后射流的扩散和粒子的运动轨迹。目前的研究工作已开展了射流结构性质，磨料与射流的混合及空气的吸入等三相流的实验和建模研究，使磨料水射流切割头包括前喷嘴，混合腔和加速混合喷嘴（或称后喷嘴）的结构得到改进，同时使磨料水射流的加工性能得到改进。

3.1　磨料分类与性质

（1）磨料的一般分类

大量的不同种类的磨料被应用于磨料水射流技术中。1995年一项调查表明，大部分磨料水射流用的磨料产品使用90%的石榴石混合制品，其他可添加的混合制品如：15%的橄榄石，15%的矿渣，11%的氧化铝及11%的硅砂。其中以氧化物和硅酸盐两组磨料系列为主。表5.4-2给出两组磨料的类型数据。

表 5.4-2　磨料的分类

氧化物	石榴石（硅酸盐）	其他（硅酸盐）
磁性	铁铝榴石	锆石
钛铁矿	锰铝榴矿	黄玉矿
氧化铝	镁铝榴石	橄榄石
金红石	钙铝榴石	硅酸铁铝矿
石英	钙铁榴石	橄榄石

（2）磨料的评价

近年来，用于磨料水射流加工的磨料在不断改进，磨料的评价变得越来越重要，主要包括以下重要特征：①磨料硬度；②磨粒形状；③磨料密度；④磨料流量；⑤磨粒尺寸；⑥磨粒成分；⑦磨料结构。

1）磨料的评价参数　Agus 介绍了一种评价磨料的方法：

$$P_{Abr} = H_p^{\alpha 1} S^{\alpha 2} P_p^{\alpha 3} d_p^{\alpha 4} m_A^{\alpha 5} \quad (5.4\text{-}26)$$

式中，H_p 表示 K_{noop} 硬度；S 表示磨粒形状因素；评价参数 P_{Abr} 直接与注入式磨料水射流以及悬浮式磨料水射流的蚀除能力有关，见图5.4-13。

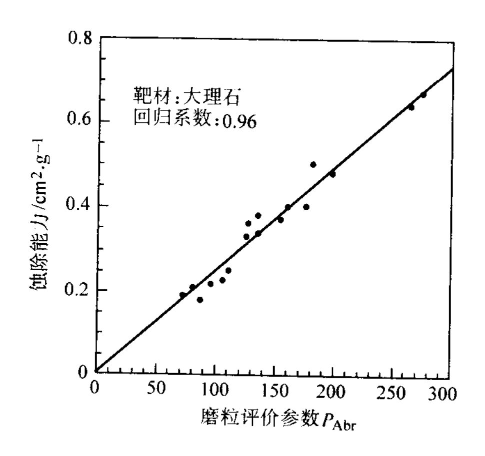


图 5.4-13　评价参数与蚀除能力的关系

2）磨料结构状态　磨料的结构状态包括以下特征参数：①网格参数；②晶体组织与对称；③化学成分；④晶体化学方程；⑤杂质（夹附水气，夹附矿物）；⑥裂纹。

3）磨料的硬度　脆性材料的硬度，这里讨论两种类型检验方法与其评价单位：一种是划擦检验法给出的 Mohs 硬度，另一种是压痕法检验给出的 Knoop 硬度。Mohs 硬度检验是基于10种矿物成分，按层布置摆放，每种矿石划擦其下一层的矿石，而不划擦其上一层的矿石。Knoop 硬度则采用一种硬度试验压头在被检对象上压出一条凹痕。图5.4-14表示 Mohs 硬度与 Knoop 硬度之间的关系。表5.4-3列出部分磨料的典型参数值。

两种硬度包括材质的关系如图5.4-14所示，其中材料除钻石、刚玉之外。表5.4-4列出几种磨料水射流切削常用磨料的硬度值，此后将讨论磨料水射流硬度对磨料水射流加工过程的影响。

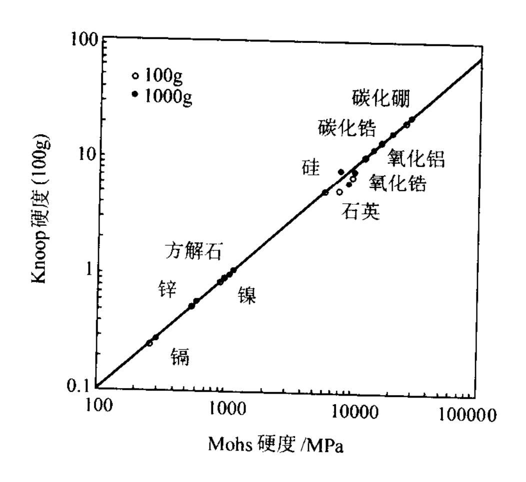


图 5.4-14　Mohs 硬度与 Knoop 硬度之间的关系

表 5.4-3　磨料的结构性质

材料	损坏比/%	网格常数［A］	单元体积［A³］
铁铝榴石	5～60	11.522（0.006）	1 529.62
锰铝榴矿	—	11.613（0.005）	1 566.15
镁铝榴石	—	11.457（0.005）	1 503.88
钙铝榴石	30	11.867（0.005）	1 671.18
钙铁榴石	80～90	12.091（0.009）	1 767.61

表 5.4-4　常用磨料的硬度值

材料硬度	硬度	
	Mohs	Knoop
氧化铝	8～9	2100
炼铜炉渣	—	1 050
石榴石	7.5	1 350
玻璃珠	5.5	400～600
硬石榴石	8	—
橄榄石	5.5	1 100
碳化硅	9.5	2 500
硅砂	—	700
钢砂	—	400～800
锆石	—	1 300

4）粒子相关尺寸　形状因素取决于单个粒子形状的性质。通过分析给出形状因素精确值。单个粒子形状有两个显著特点：长度比，宽度比以及厚度比，体积比。图 5.4-15 给出磨料形状特征化的相关比例：延伸比与平直比，其表达式如式（5.4-27）、式（5.4-28）所示。

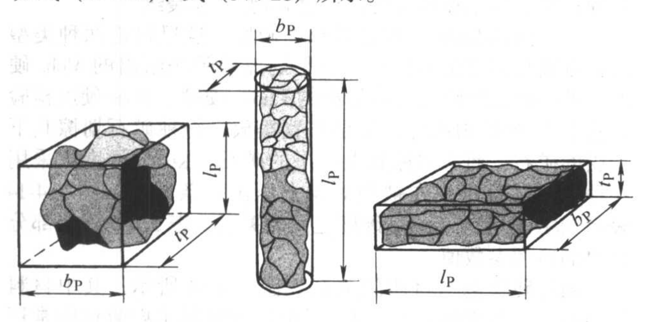


图 5.4-15　磨料形状特征化的相关比例

$$r_e = l_p / b_p \tag{5.4-27}$$

$$r_F = b_p / t_p \tag{5.4-28}$$

进一步分析关系式（5.4-28），研究磨粒形状对单个粒子冲击蚀除过程的影响，发现磨料类型，磨料直径及磨料形状之间存在的关系。碳化硅粒子由椭圆形变得更细长；随着粒子尺寸的增加，氧化硅粒子的情况却恰好相反，由细长变成椭圆形，见图 5.4-16。

5）粒子的几何形状　这里几何形状是一种体积形状因素，它表示单颗粒子近似的一种理想形式（立方体，球形体，四面体），其中球形体的表达式如下：

$$S_p = \sqrt{\frac{4}{\pi} b_p l_p / d} \tag{5.4-29}$$

在二维坐标中，式（5.4-29）给出粒子冲击加工区域产生的粗糙度表达式：

$$S_R = \sum \left(\frac{2r}{d_p}\right) / N \tag{5.4-30}$$

如图 5.4-17b 所示，球形体与粗糙度关系范围从 0～1 表示了从适合各种角度的粒子至适合于理想圆形粒子的情况。几种研究结果证明用粗糙度与球形直径（见图 5.4-18a）来表示单个磨粒形状特征适用于磨料水射流切削过程。

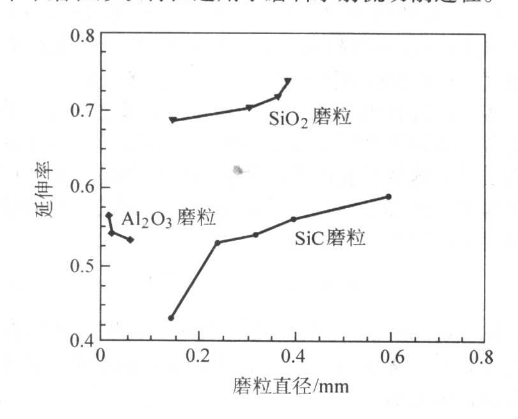


图 5.4-16　磨料尺寸与磨粒形状之在的关系

进一步改进圆形磨粒的参数表达式：

$$F_0 = 4\pi A_p / P^2 \tag{5.4-31}$$

式中，$P = P_x + P_y + \sqrt{2} P_{xy}$

式中形状参数：

$$F_{sh} = d_{min} / d_{max} \tag{5.4-32}$$

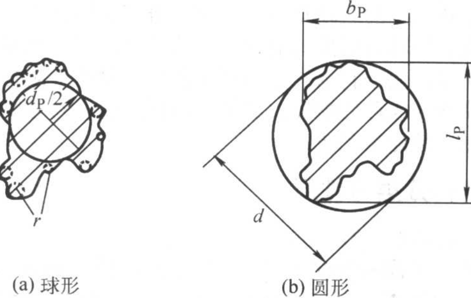


图 5.4-17　磨粒几何形状特性

图 5.4-18b 表示两组参数，对于圆形，$F_0 = 1$ 及 $F_{sh} = 1$。表 5.4-5 给出部分对于不同磨料类型的典型数值。

在图 5.4-19 中，同样定义不同类型的石榴石磨料的各种粒子形状。

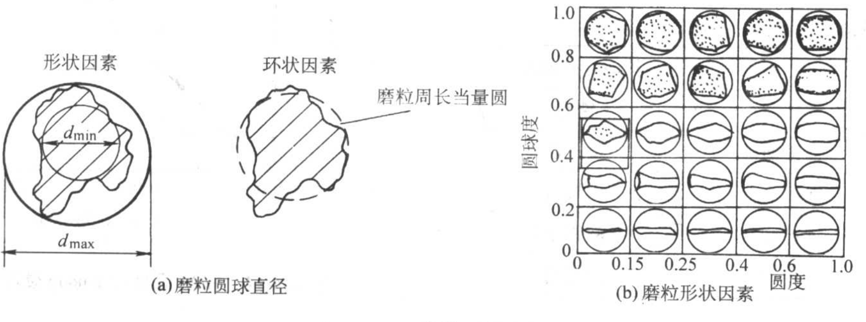


图 5.4-18　磨粒形状参数特征

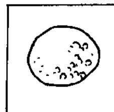
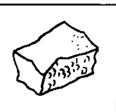
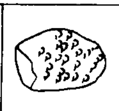
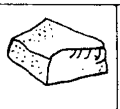
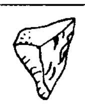
      

图 5.4-19　石榴石磨料各种粒子形状

表 5.4-5 给出了对于磨料各种粒子形状因素的比例。

表 5.4-5　石榴石磨料的形状因素和形状特征

矿物材料	细分类型	形状参数	
		F_0	F_{sh}
铁铝榴石	B	0.66	0.65
	M	0.69	0.67
	K	0.68	0.66
	G	0.66	0.64
钙铝榴石	—	0.71	0.70
钙铁榴石	V－A	0.67	0.65
	V－B	0.68	0.68
	V－C	0.65	0.68

6) 尺寸分布　术语“直径”专门指任何可等测的粒子尺寸。对比粒子尺寸要根据尺寸大小选择所用的单位，用英寸或者毫米测量并表示粗大粒子，微小粒子采用筛号尺寸度量，更细的要用微米或者微压计表示或测量。虽然多数的直径定义被人们熟悉，而这里一般直径是根据粒子实际性质来定义，例如粒子的体积或者表面积，或者根据特殊情况和性能来定义，例如粒子在水中的环境状态等。

在磨料水射流加工领域，粒子尺寸是根据泰勒标准筛分系列确定的筛目号及相关粒子尺寸分布和选用的粒子形状。回归研究建立了泰勒标准筛与平均粒子直径的关系如下：

$$D_p = 17\,479M^{-1.031\,5} \qquad (5.4\text{-}33)$$

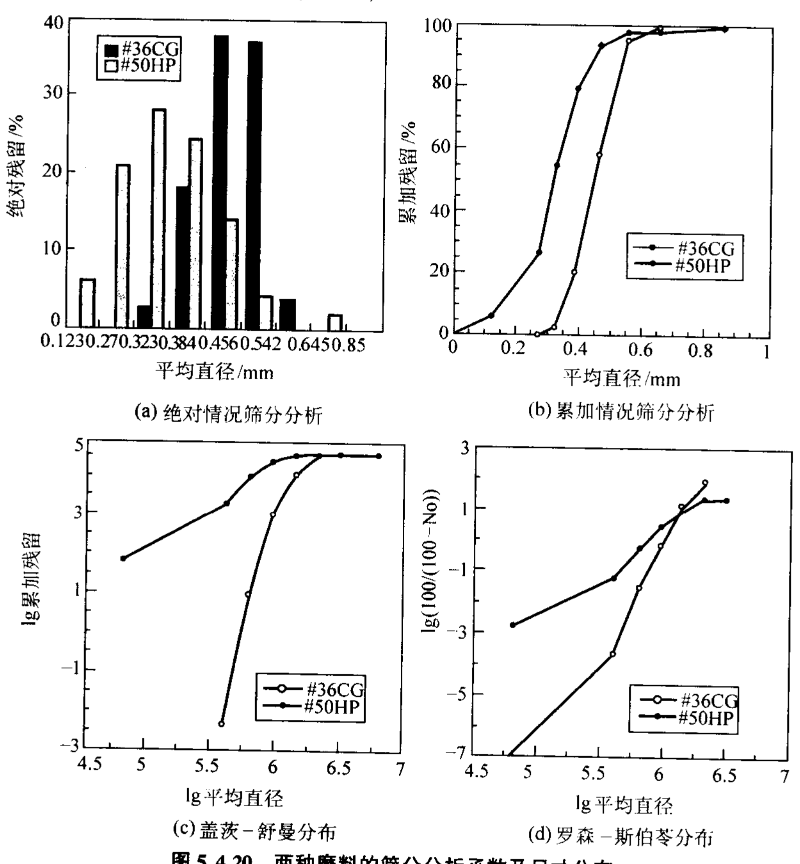
式中，回归系数，$R^2 = 0.998$，多数磨料水射流用户倾向使用的筛目号为：50#，60#，80# 及 100#。

7) 筛分分析　由于对单个粒子评价比较困难，所以把粒子划分为若干组可行的尺寸范围来进行尺寸分析。表 5.4-6 给出筛分分析数据，特别适用于磨料水射流加工的磨料样品。

表 5.4-6　两种石榴石磨料的筛分分析数据

筛孔/μm	36# CG		50# HP	
	平均残留/%	标准偏差	平均残留/%	标准偏差
246	—	—	6.1	2.5
295	0.1	0.0	20.9	4.7
351	2.6	0.2	28.0	2.9
417	18.1	1.0	24.6	3.3
495	38.0	1.1	14.2	4.4
590	37.1	1.6	4.3	2.1
700	4.0	0.6	—	—
其余	0.1	0.0	2.0	1.0

用粒子尺寸作横坐标，用质量性能作纵坐标，绘出曲线形式表达。表示质量的方法有两种：一种是各个尺寸的绝对值，见图 5.4-20a。一种是高于或者低于筛分尺寸的累加值，见图 5.4-20b。



(a) 绝对情况筛分分析　(b) 累加情况筛分分析

(c) 盖茨－舒曼分布　(d) 罗森－斯伯苓分布

图 5.4-20　两种磨料的筛分分析函数及尺寸分布

目前，已建立了微细粉末产品尺寸分布的几种模型，其中大部分是半经验公式，建立这些表达式关系用于描述制粉的尺寸分布。常用模型的一般表达式为：

$$M_0(d_p) = f\left(\frac{d_p}{d^*}\right)^n \quad (5.4\text{-}34)$$

式中，d^* 表示平均粒子直径。当公式接近尺寸上限，d^* 即是分布中最大粒子尺寸。式（5.4-34）还包括第二个参数，n 即通常称之为分布参数，因为它衡量着粒子尺寸分散的程度。n 值越大，粒子样本结构越均匀。当 $n\to\infty$ 样本构成粒子具有相同的直径。

3.2 磨料水射流的计算流体力学模型

为进一步搞清材料的去除过程，建立磨料水射流切割性能数学模型，如射流穿透深度，射流特性与分布等这些与射流切割质量密切相关的性质，同时计算流体力学（简称CFD）模型还可以用来改进切割系统设计，制造和加工性能。最近的研究关于计算流体力学模拟技术，对磨料水射流的动力学性质与行为，如：射流速度和压力分布；粒子的速度和分布等，计算流体力学模型是基于气、水、粒子3相湍流建立的。使用的商用软件 FLUENT5.5 工具软件。

1）计算流体力学模型基本方程　为进一步研究射流的速度和压力分布及粒子的动态方程，用 FLUENT5.5 工具软件建立多相流模型，假设射流的计算流体力学模型为二相流，并假设水流为基本相而只有少量气体带入，则第 q 项微分连续方程为：

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (5.4\text{-}35)$$

式中，α_q 为微分方程第 q 项；μ_i 为 x_i 轴方向上的速度；t 为时间。基于微分方程约束的所有基本项构成连续方程的总和。

射流速度分布在计算域内解动量方程

$$\frac{\partial \rho\mu_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho\mu_i\mu_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}\mu\left(\frac{\partial \mu}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial}{\partial_j}(-\rho\mu'_i\mu'_j) \quad (5.4\text{-}36)$$

式中，μ_i，μ_j 分别代表坐标轴方向上的速度；P 为静态压力；ρ 为射流密度；μ 为动态黏度；$\mu'_i\mu'_j$ 为雷诺压强。

湍流传递方程能量 K 和扩散率 ε，在模拟过程中选择 $K-\varepsilon$ 标准模式，得到关系式

$$\rho\frac{DK}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\left(\frac{\mu+\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + G_k - \rho\varepsilon\right]\right. \quad (5.4\text{-}37)$$

和

$$\rho\frac{D\varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{K}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{K} \quad (5.4\text{-}38)$$

式中，μ 为湍流黏度；$\mu_t = \rho C_\mu \dfrac{K^2}{\varepsilon}$；$G_k$ 是由于平均速度梯度产生的湍流运动能；C_μ、$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、σ_k、σ_ε 为常数，分别为 $C_\mu=0.09$，$C_{1\varepsilon}=1.44$，$\sigma_{2\varepsilon}=1.92$，$\sigma_k=1$，$\sigma_\varepsilon=1.3$。

FLUENT5.5 软件通过综合力平衡作用在每个粒子上的综合力平衡，包括粒子的惯性力和拖后力，计算粒子运动轨迹。对于单个粒子的力平衡方程为：

$$\frac{d\mu_p}{dt} = F_D(\mu - \mu_p) \quad (5.4\text{-}39)$$

式中，μ 为流体速度；μ_p 为粒子的速度；$F_D(\mu-\mu_p)$ 为每单位粒子质量的拖后力。F_D 由下式给出：

$$F_D = \frac{3\mu C_D R_e}{4\rho_p d^2} \quad (5.4\text{-}40)$$

式中，μ 为射流分子黏度；ρ 为流体密度；ρ_p 为粒子密度；d 为粒子直径；R_e 为雷诺数；C_D 为拖后系数。

这些基本方程可以转换成极坐标形式，可以用于稳态、湍流、不可压缩、二相轴对称流。基于控制总量技术用于转换基本方程成为代数方程，然后求解数值解。取得纯水射流解法后，粒子运动及轨迹仍采用 FLUENT5.5 软件推导得出不连续模型。

2）假设及边界条件　图 5.4-21 表示带有边界条件计算域的几何模型，射流分布首先要解出纯水射流分布，水射流被看作为二维，轴对称湍流流过 1 mm 直径水喷嘴，进入大气成为自由射流。在计算流体力学模拟中，射流进入计算域通过 AB 部分。假设水流在流出喷嘴前，沿水流截面的速度有两类分布，一类是均匀分布，一类是 1/7 次幂指数分布。在每种速度分布情况下，速度变化范围大致在 500～950 m/s 之间，水流以入口速度通过 AB，在喷嘴的加速作用下获得湍流运动能和伴随扩散。

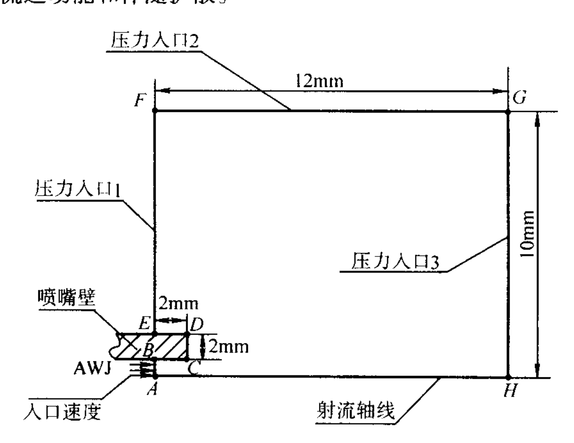


图 5.4-21　计算流体力学计算域几何与边界条件

得到水流速度变量后，计算添加磨粒进入纯水射流中。值得注意的是假定粒子与粒子之间没有相互干扰。同时假设粒子在入口处的初速度与其周围的水流速度相等。基于上述假设可以计算出磨料粒子的运动速度和轨迹。

在计算流体力学模型中，见图 5.4-21 边界 EF、FG、GH 被看作是自由边界，考虑大气压力的入口条件也作为边界条件之一，对于任何流体中的气体分量进入计算域通过 EF、FG、GH 构成一个整体的计算域。

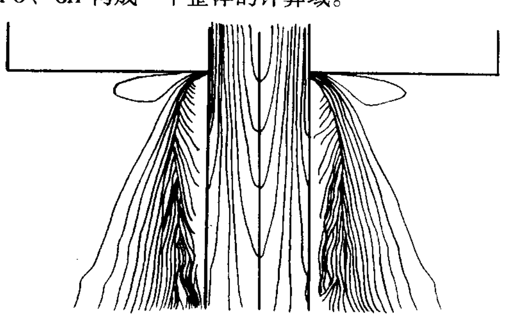


图 5.4-22　水流速度分布

3.3 算例

模拟分析速度和动态压力沿射流轴向以及径向分布模拟结果，见图 5.4-22。可见 1/7 次幂指数分布比均匀分布更接近实验测量的分布，所以下面给出幂指数分布模拟结果。

1）纯水射流性质　用计算流体力学模型计算算例，典型的射流速度分布如图 5.4-22 所示。可以看到峰值速度总是在射流中间，还可以看到在喷嘴出口至 10 mm 范围内几乎没有射流的侧面扩散，甚至在计算域 70 mm 范围内仍显示了类似的趋势。同时发现有空气带入射流，但影响区域很薄，



只在射流外层。首先分析速度和压力沿射流轴向的发布，计算结果如图 5.4-23 所示，其中轴向距离从计算域进入 AB 段，即速度入口处。能够看出速度和压力分布在核心区与边缘区的不同性质。图 5.4-23 表示中心区（$R=0$ mm）与边缘区（$R=0.47$ mm）的分布性质，分析得到主要由于空气的带入，导致速度和动态压力随射流离开入口而不断降低。相反，射流速度在边缘区（距喷嘴出口 2 mm 处）有跳跃式增加，原因是由于喷嘴出口处较高的湍流能量引起的，这也符合边界层理论。有意思的现象如在喷嘴出口边缘区有一突变的，小的射流动态压力的下降，这是由于空气的带入引起射流密度下降的结果；同样在喷嘴出口，速度和动态压力在边缘区随射流离开喷嘴而稍稍增加，这也是由于射流高速引入的结果。

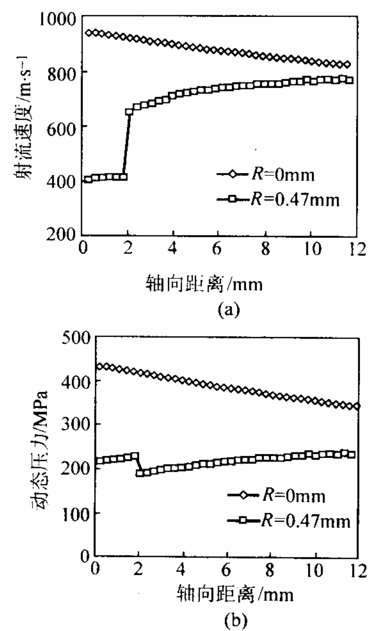
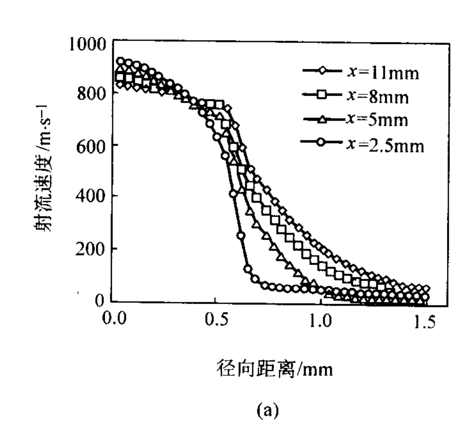


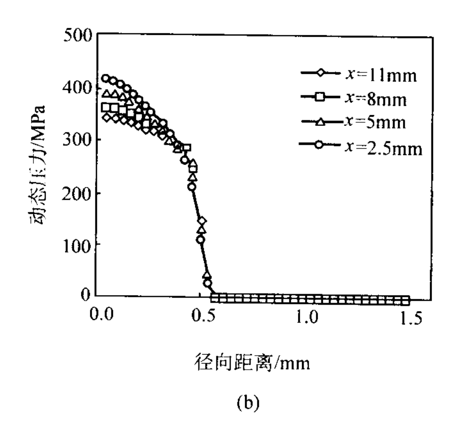
图 5.4-23　速度与动态压力沿射流轴向分布

图 5.4-24 给出速度与动态压力在射流径向的分布。在不同计算域区段 2.5 mm、5.0 mm、8.0 mm、11.0 mm 处，由图 5.4-24a 可以看出射流速度随着半径的增加而减小（四部分区段上的分布趋势相同），下降曲线接近于指数曲线。在 0.5 mm 以内速度下降较小，超过 0.5 mm 有明显的空气带入计算域，速度明显下降。自由射流的动态压力在四部分区段上的分布没有明显差别，见图 5.4-24b。动态压力在核心区 0.4 mm 左右范围稍稍下降，随后迅速下降至边界处为零。从计算射流分布结果表明射流没有明显扩散，只保持几乎不变的直径通过计算域。这基本上反映了研究中所考虑的小计算域的情况，与多数研究结果相符，该计算模拟结果是在实际加工中应尽量采用小的悬距参数进行磨料水射流切割，保证其对上切口宽度影响小，保证切口性能和质量。

2）粒子速度与轨迹　首先假设粒子形状为球形的，选用的四种粒子尺寸（直径）分别为 0.05 mm、0.1 mm、0.18 mm、0.25 mm。同时假设粒子被吸入到射流入口处即获得与水流相同的速度。图 5.4-25 表示了粒子在磨料水射流中的分布。为方便比较，同时给出射流核心区水的速度分布，如图 5.4-25a 所示。粒子速度随射流离开计算入口而下降，但总是高于其周围的水流。这是因为粒子的密度高于水的密度而具有较大惯性力的结果。而且可以看出不同尺寸的粒子在射流中的性质不同，较大尺寸的粒子速度高于较小尺寸的粒子，因为较大粒子的质量高于较小粒子的质量，所以较大粒子的惯性力大于较大粒子的惯性力。根据上述分析得出在磨料水射流切割应用中，核心区中的较大粒子切割穿透能力高于较小粒子。

图 5.4-25b 表示粒子被吸入水流离中心 $R=0.45$ mm 处的速度分布，在该区域由于射流核心区空气的混入导致粒子的速度随水流离开喷嘴而增大，结果是核心区粒子速度下降，边缘区粒子速度增大。这种趋势亦可用于磨料水射流切割中，其中利用较大粒子质量大，惯性力大，在边缘区得到的加速小，而较小粒子在边缘区得到的加速快，在该区域的材料去除率高于较大粒子的去除率。总之，在一定磨料尺寸和加工参数范围内，可以分别发挥较大粒子在核心区的较大穿透作用，以及较小粒子在边缘区的较高切割性能的作用。无论如何，应该注意到边缘区的总体速度低于核心区的速度，只有搞清粒子尺寸、磨料水流的速度和压力分布与切割性能的关系，才能有效确定加工参数。





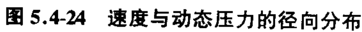
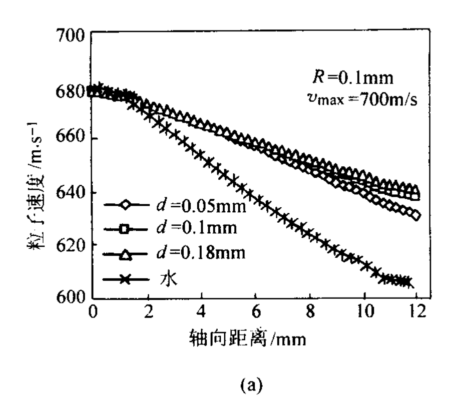


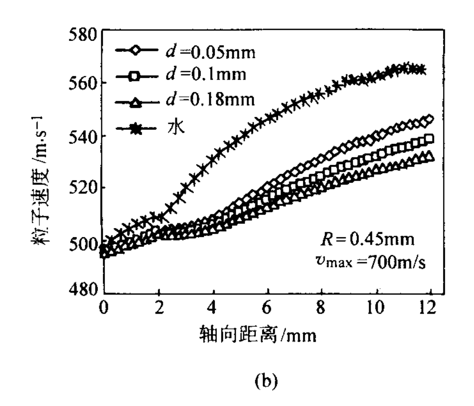
图 5.4-24　速度与动态压力的径向分布

值得特别注意是，粒子在射流中速度不同，运动轨迹也不相同，这对加工能力及效果有一定影响。计算流体力学模拟与实验结果还表明粒子沿着连续水流运动，粒子的尺寸和供给的位置对粒子的运动轨迹影响不明显，这也是可以利用的物理现象。

另外，这里介绍的计算流体力学模拟采用的计算域小于实际磨料水射流，应该进一步扩大计算域，进一步计算研究符合实际情况的边界条件，使计算流体力学模拟更有效用于喷嘴的优化设计、加工参数的优化与选用和切割性能的有效评价。



(a)



(b)

图 5.4-25　粒子沿射流轴向的速度分布

4　加工参数及其应用

4.1　参数名称与简单分类

1）加工参数　大量的加工参数特征确定了磨料水射流切割工艺的效率，经济性和质量。因此对加工参数进行科学地定义，分类与优化是成功应用磨料水射流技术的基本要求。总体上，磨料水射流切割加工参数分类见表 5.4-7。

2）靶材参数　在磨料水射流切割应用中，切深（h）、工件厚度（h_s）是靶材最重要的几何参数。在某些条件下可以被分开使用，在一些情况下联合使用，它们之间的关系式可以简化为：$h_s=0.8h$，见图 5.4-26。另外重要的与加工参数和靶材参数都有关系的物理参数为材料的去除率（A_h），$A_h=hv$，式中 v 为射流移动速度。静态的去除体积可以用切口几何尺寸来表示 $v_M=hb_hL_h$（分别为切口三边平均尺寸）。动态的与射流移动速度有关的，即切割过程中的体积去除率为：

$$V'_M=hb_hhv=\frac{V_M}{t_E} \tag{5.4-41}$$

表 5.4-7　磨料水射流切割相关参数

1）流体参数 泵压（P） 形成射流喷嘴直径（d_0）	2）切割工艺参数 移动速度（v）　悬距（x） 切割次数（n_p）　冲击角（φ）
3）混合加速参数 混合喷嘴直径（d_f） 混合喷嘴长度（L_f）	4）磨料参数 磨料流量（m_a）　磨粒形状 磨粒直径（d_p）　磨粒硬度（H_p） 磨粒尺寸分布（$f(d_p)$）　磨料循环再生性

考虑射流流量和磨料流量的关系，因为它们是由水压力和形成射流喷嘴直径的大小决定的。为了达到优化加工参数的目的，因此，联系常规的靶材参数和加工参数，特定磨料流量条件下，给出的优化切割率为：

$$A_{hA}=\frac{A_h}{m_a{}'}=\frac{hv}{m_a{}'} \tag{5.4-42}$$

式中，m_a 为磨料质量；v 为射流移动速度。

4.2　加工参数优化

为了提高磨料水射流加工精度，质量以及加工能力，深入研究磨料水射流加工中磨料射流的性质及其与材料相互作用过程，揭示磨料水射流特性及其与被加工对象的作用机理是十分重要的。分析描述去除机理的手段大致分为：建立磨料水射流的性质及其加工特征的数学模型；实验检测分析加工参数与加工质量的对应关系或相关关系。两种方法既是揭示磨料水射流加工现象和规律的手段，也是优化加工参数的手段。

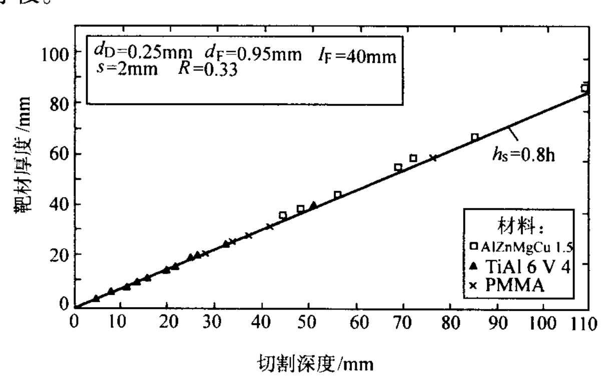


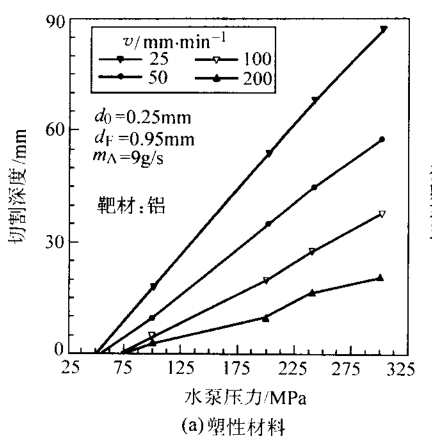
图 5.4-26　切割深度与材料厚度的关系

由于磨料水射流加工过程十分复杂，加工参数及其影响因素的确定必然是十分复杂的。研究人员正在努力探索找到简单、准确和实用的优化方法，解决加工参数的优化问题。①在这个过程中，首先，人们还必须通过实验检测找到各个加工因素与加工性质和效果的关系，获取原始的实验数据建立经验或者半经验公式；②与此同时，在理论上通过磨料水射流计算流体力学建模描述粒子速度，分布，结构及其与材料表面的作用特征，推导出单个粒子的去除模型，进一步累积为切口的形成（考虑粒子性能），建立起能准确描述切口性能的数学模型，这种方法建立的方程适用于每个加工参数的单因素影响规律，对应的数学模型建立和优化只符合单因素的情况。在一定条件下，即单个因素起决定作用的情况下，该方法是有效的。但加工参数优化普遍性或一般问题是复杂的，各个因素之间相互影响，存在着统计相关的关系，此时的优化仅靠单因素优化无法准确反映加工参数的全部作用和规律，因而，必须采用多目标优化方法进一步优化系统整体的参数以提高加工质量和能力满足研究与生产实践的需要。

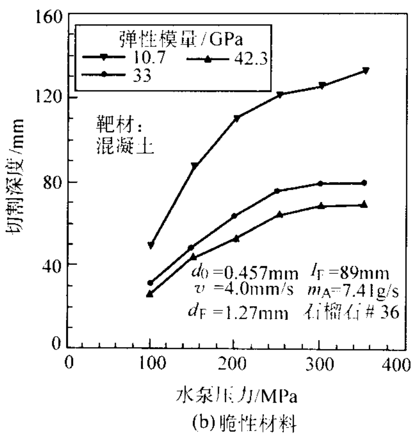
最典型的多目标优化实验方法是正交实验，对于优化生产实际的加工参数既简单又实用。随着计算机技术的发展，各种计算方法，优化方法，工具软件不断商业化，为准确建立磨料水射流加工与性能效果的数学模型提供了有效手段。值得注意的是立足于各个学科基础，建立符合实际的加工参数和加工质量关系与模型，辅以实验验证，探索出简单、有效的数学模型。

本节以水压力为例，介绍单因素优化加工参数的思路、原理、方法和具体情况下的优化结果。从参数与目标的影响关系出发，通过实验与建模反复研究和提高，推导优化加工参数一般解法、一般趋势。





(a)塑性材料



(b)脆性材料

图 5.4-27　水泵压力和切深的关系

图 5.4-27 为水泵压力和切深关系的实验曲线，其数学表达式为：

$$h(p) = C_1(p - p_{thr})^{C_2} = \frac{\Delta h}{\Delta p}(p - p_{thr})^{c^2} \qquad (5.4\text{-}43)$$

这个关系式表达了水压力与射流形成过程、磨料加速与混合、材料去除及它们之间复杂关系，实验证明，水射流速度随泵压力升高而提高，类似图 5.4-27a 所示的趋势，效率参数 μ，可压缩性系数 K 随水泵压力升高几乎呈线性下降，因此

$$V_0(p) = \sqrt{2}\mu(p)\sqrt{\frac{p}{\rho_w(p)}} \qquad (5.4\text{-}44)$$

水泵压力是影响磨料粒子平均速度的主要因素，并影响和决定所有与速度参数有关的参数。例如磨料流量、磨料的吸入和吸入压力取决于射流速度，气流的吸入与气流量也随压力的增加而增大。观察表明，水压力影响射流中水流及磨料的分布，这些分析与关系式（5.4-44）相符。结合两种方法，分析和优化水压力参数与加工性能的关系。

1）诱导阶段和阈值压力　第一阶段 $p < p_{thr}$，即为诱导阶段。诱导阶段的压力在冲击材料过程中没有材料去除，当压力达到一临界值 p_{thr} 时，开始有材料去除，参数 p_{thr} 为去除材料的最小压力值也称阈值压力。对脆性材料，Evans 等建立了固体粒子蚀除最小值概念，模型中粒子的阈值速度为：

$$V_{thr} \propto K_{IC}^2 C_M^{0.33} \qquad (5.4\text{-}45)$$

在脆性材料上进行的实验进一步表明了上述关系，见图 5.4-28。图 5.4-29 进一步给出阈值压力与加工参数之间的关系

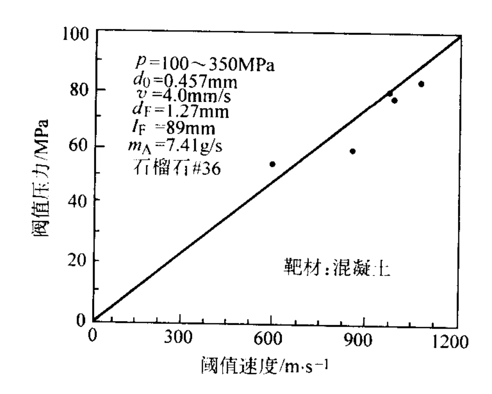


图 5.4-28　阈值速度与阈值压力之间的关系

2）线性阶段和下降阶段　第二阶段 $p_{thr} < p < p_{cr}$，即为线性阶段，切深随压力增加而线性增大，该阶段 $C_2 = 1$，产生切深的增加与压力的增大成正比。比例系数为 $dh/dp > 1$，它与前述的所有加工条件和靶材性质有关。图 5.4-30 给出部分加工参数对比例系数 dh/dp 的影响实验曲线。

最后阶段 $p_{thr} > p_{cr}$ 称为下降阶段，在这个阶段压力的变化对加工深度的影响不大，压力范围 $0 < C_2 < 1$。这个性质出现在很高压力和准脆性材料中。$p = p_{cr}$ 是有效切削极限，超过这个压力，切割过程的效率大大降低。

3）优化参数　由式（5.4-43）和 $E_A \propto p^{1.5}$ 关系，可估计出材料去除效率。对于有效加工特定能量 $E_{sp} = E/h$ 条件下，有下列关系式，并求出极值：

$$\frac{dE_A}{dh} = \frac{d(C^2 p^{1.5})}{d[C_1(p - p_{thr})]} = 0 \qquad (5.4\text{-}46)$$

解式（5.4-43）代入式（5.4-46）得：

$$p(E_{spmin}) = 3p_{thr} \qquad (5.4\text{-}47)$$

即压力为 3 倍的阈值压力时，材料去除效率最大。相反，特定去除能量和特定切削能量值最小。对高压条件假设的非线性关系，切削过程效率同样随水泵压力的提高而下降，见图 5.4-31，从中得出压力与加工深度，切割能量与效率的优化关系。

4.3　加工实例

作为新兴的切割技术，磨料水射流加工有独特的优势。在介绍了磨料水射流的磨料射流性能，切口性能和建模后，进一步结合典型材料的磨料水射流切割，有利于理解和掌握磨料水射流的加工参数，切割性能，加工质量，切割机理和建立优化预测模型等。

4.3.1　磨料水射流切割涂层复合金属板

冶金涂层复合金属板已得到广泛应用。与激光加工技术相比，磨料水射流切割技术具有切割热影响小，不变形和不分层等特点，为冶金涂层复合金属板材料的更广泛应用提供了切割技术保证。

1）实验　实验是在 FLOWINTERNATIONAL 水射流切割机上进行的。设备配有 20 模式双级增压器，输出水压力 380MPa，配有五轴机械手和定位系统，试件为 Zincalum G 300 由澳洲 BHP 公司提供。涂层每边厚 0.021 ~ 0.025 mm，基本化学成分 C 0.04% ~ 0.07%，P 0.01% ~ 0.02%，Mn 0.20% ~ 0.30%，Si 0.01% ~ 0.02%，Al 0.30% ~ 0.50%，屈服强度 330 ~ 390 MPa，硬度 55 ~ 65HR30T。实验用扫描电子显微镜（SEM）观测切割质量和通用光学显微镜测量切口几何尺寸等。

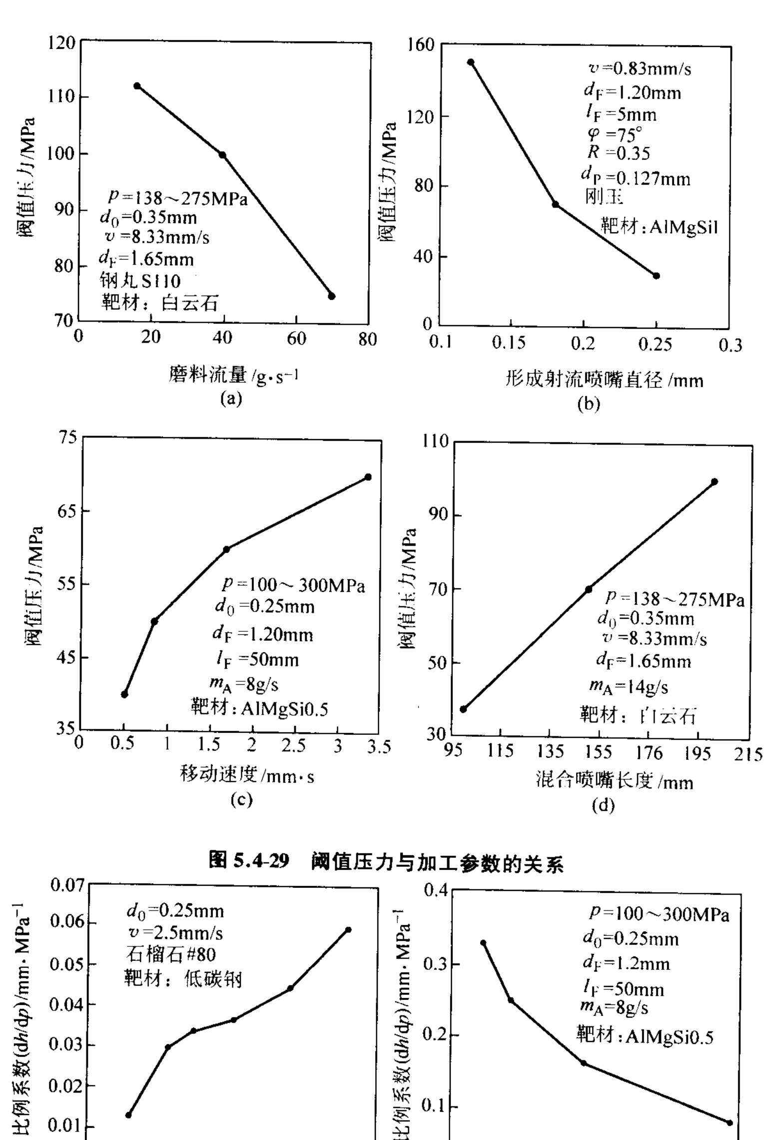


图 5.4-29　阈值压力与加工参数的关系

图 5.4-30　比例系数 dh/dp 与加工参数的关系

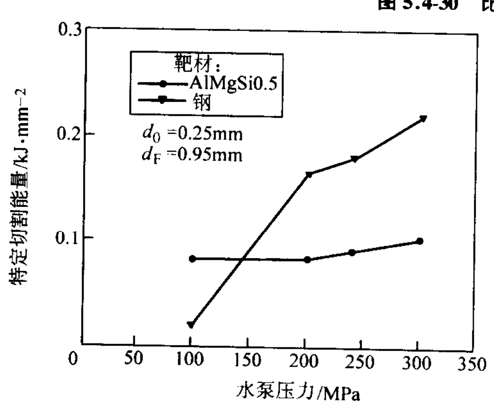


图 5.4-31　水泵压力和特定能量的关系

磨料水射流切割涉及的加工参数有很多，但结合设备可调的主要参数有：水压力、射流移动速度、磨料流量和悬距。这些变量影响切割性能的结果有：切深、宽度、锥度和粗糙度质量等。在推荐参数基础上，考虑四种加工参数对切深、宽度、锥度和表面粗糙度等切口性质的影响趋势，利用正交实验，实验找出多目标优化加工参数。选择四因素三水平表：压力 P（240 MPa，290 MPa，340 MPa）、移动速度 v（6.67 mm/s，10 mm/s，13.33 mm/s）、磨料流量 m（6.67 g/s，8.33 g/s，10 g/s）、悬距 x（2 mm，3 mm，4 mm）、确定冲击角90°、条件参数：一级喷嘴直径 0.41 mm，二级喷嘴直径 1.02 mm，二级喷嘴长 76.2 mm，磨料选用 80 石榴石砂。实验中，需注意喷嘴的磨损对实验结果的影响，需及时检查，及时更换。

在金属板的加工中，除了要关心切口形状（宽度，深度，锥角）和质量（表面粗糙度）外，还特别要关心切口出口处的毛刺。

2）加工参数对切口性质的影响　切口形状是磨料水射流切割加工中的主要性质因素。一般条件下磨料水射流的切口形式为上宽下窄的锥形截面，用切口锥角表示切口壁的倾角，定义锥角为：

$$Q = \arctan\left(\frac{w_t - w_b}{h}\right) \tag{5.4-48}$$

式中，w_t 为切口上部宽度；w_b 为切口下部或测量点处的宽度；h 为切口上部至测量点 w_b 处的垂直距离。

图 5.4-32～图 5.4-34 给出加工参数对切口形状影响的趋势与关系。从图 5.4-32 可以看出整体的切口宽度随水压力的增加而变宽，解释其原因为较高的水压力产生较大的射流运动能，较大运动能产生较大的材料去除量，所以切割出较宽的切口。分析还发现水压对切口上部宽度的影响，当压力增至 290～340 MPa时，上部切口宽度不再加宽，甚至变窄。这是由于磨料水射流在压力超过阈值压力时作用减弱，此时宽度取决于其他参数。由于下部切口宽度随水压力增大而稳定增加，能够得出当压力增加到 340 MPa 时，切口锥角逐渐减小。加工参数悬距对切口宽度与锥角的影响如图 5.4-33 所示。尽管下切口宽度的增加量相对较小，可以看出整体切口宽度随悬距的增大而变宽，这是由于射流离开喷嘴产生扩散的结果。

图 5.4-34 表示射流移动速度对切口形状的影响，切口宽度随移动速度增大而减小。进一步考察发现，移动速度增大对上下切口宽度的减小速率不同，在底部减小的比上部更快，所以移动速度增大引起切口锥角增大。

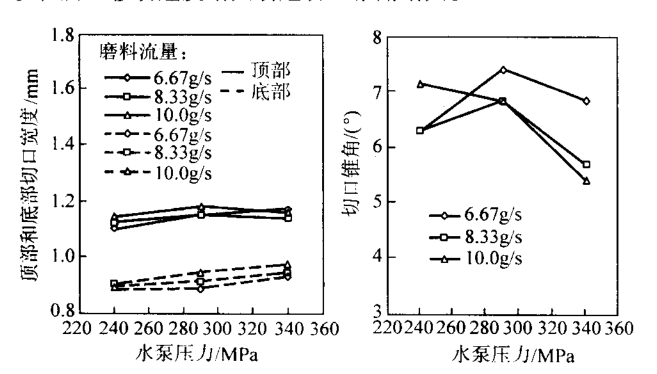


图 5.4-32　水压力对切口形状的影响

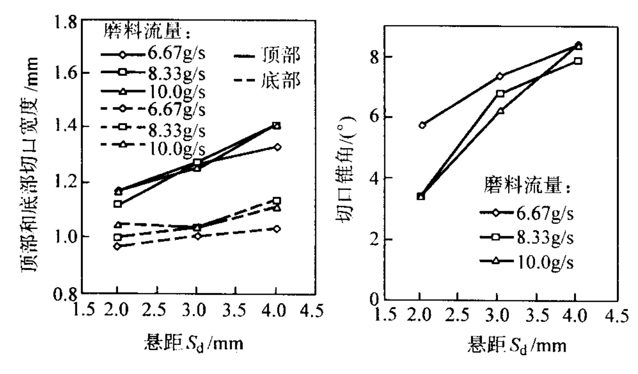


图 5.4-33　悬距对切口形状的影响

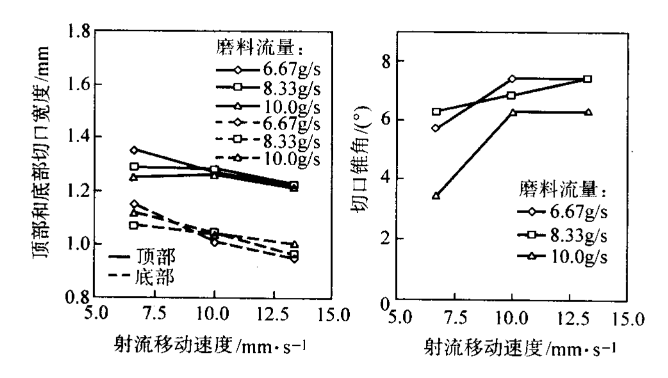


图 5.4-34　移动速度对切口形状的影响

磨粒流量对切口形状的影响可以从图 5.4-32～图 5.4-34 看出，在实验参数范围内，磨料流量对切口宽度无明显影响。某些条件下，磨料流量的不稳定增加，反而减小切口宽度，原因是这种磨料供给状态可能导致磨粒间的冲突，改变了粒子的速度、轨迹和冲击角，因此降低了磨粒的有效冲击作用。

3）加工参数对表面粗糙度的影响　表面粗糙度和波纹度是磨料水射流切割质量的主要评价因素。纹路和波纹是束流切割特有的性质，研究其成因，规律以及与加工参数的关系有重要意义。总体上，纹路是在切口的下表面形成的，它随深度的增大，即射流能量的减小而明显增大。只有在采用合理加工参数切割很薄的板材时，切割表面纹路现象才会消失，此时只用表面粗糙度评价切口质量。图 5.4-35 表示随射流移动速度的增加和磨料流量变化情况下，切割表面粗糙度的变化趋势，表 5.4-8 给出统计数据进一步说明水压力和悬距对表面粗糙度的影响。

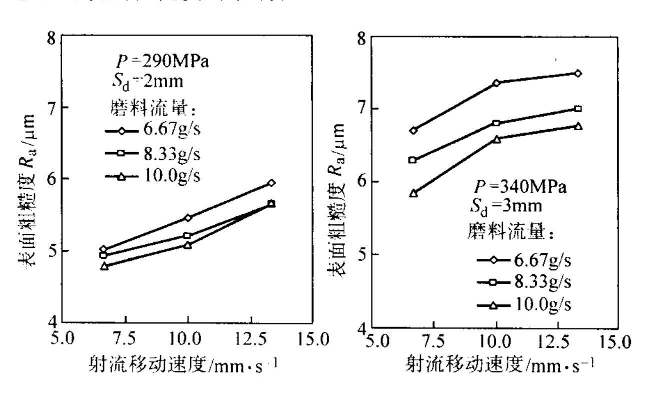


图 5.4-35　移动速度对表面粗糙的影响

从实验结果分析，移动速度增大引起表面粗糙度增大，见图 5.4-35。这是由于移动速度的增加减少了磨料重叠蚀除的机会，使得表面粗糙度相对增大。

表 5.4-8　水压力和悬距对表面粗糙度的影响 R_a

/μm

水压力 /MPa	悬距					
	2 mm		3 mm		4 mm	
	平均 R_a	R_a 范围	平均 R_a	R_a 范围	平均 R_a	R_a 范围
240	4.86～6.70	5.81	5.06～7.22	6.18	5.09～7.14	6.29
290	4.80～5.94	5.30	5.28～6.61	5.91	5.36～6.72	5.92
340	5.80～7.70	6.58	5.83～7.50	6.75	7.93～8.75	8.01

可以看出表面粗糙度不是随水压力线性变化，开始时，在水压 240～290 MPa 范围内，粗糙度随水压力增大而降低；当水压进一步增大时，表面粗糙度开始下降。例如，水压达到 290～340 MPa 范围内时，平均粗糙度分别增加 24.2%、14.4%和 35.3%，对应的悬距分别为 2 mm、3 mm 和 4 mm。这个趋势可以从强度区域图 5.4-35 得到解释。压力进一步增加，射流扩散外缘获得足够的能量切割材料，扩散外缘的湍流作用导致磨料的不规则运动和表面粗糙度的增大。悬距的影响很明显，随着悬距的的增大表面粗糙度稳定增大，实验表 5.4-8 的数据证明了由于水流的扩散不仅使切口宽度增加而且导致表面粗糙度增大。

4）加工参数对毛刺形成的影响　毛刺的形成是磨料水射流切割塑性材料的现象之一。研究毛刺的形成原因，规律及其与加工参数的关系同样是十分重要的。考虑实际情况，某些疏松并容易去除的毛刺可以被忽略，主要考虑的是坚硬

毛刺的形成与消除。表 5.4-9 给出毛刺的产生形式与按组分类的规范，既可用于基础研究又可用于生产实践。

表 5.4-9 毛刺的产生与分类

分类	高度/mm
少无毛刺	0.00 ~ 0.02
低小毛刺	0.02 ~ 0.05
中等毛刺	0.05 ~ 0.08
较大毛刺	0.08 ~ 0.12
超大毛刺	>0.12

表 5.4-10 归纳了不同切割条件下毛刺的数量，其大小按照表 5.4-9 分类。例如，0.01 mm 为少无毛刺组，0.15 mm 为超大毛刺组，则不同切削条件的平均高度可以简化分类得到，见表 5.4-10 最后一栏。可见当压力为 240 MPa 时产生的毛刺较大，这表明在此水压力范围内，磨料去除以变形磨蚀为主，磨料冲击导致材料在切口底部出口处卷曲形成毛刺。还可以看出随着射流移动速度的降低毛刺的大小明显减小；悬距的增加将引起毛刺高度的增大；前者是由于低速度移动磨料切割充分，减少了毛刺的形成机会，后者归因于射流能量的降低，产生材料的变形和形成卷曲的较大毛刺。基于磨料的平均高度，磨料流量对毛刺的形成影响不大。

表 5.4-10 加工参数对毛刺形成的影响

加工参数		毛刺数量					平均大小
		少无毛刺	低小毛刺	中等毛刺	较大毛刺	超大毛刺	mm
水压 /MPa	240	2	0	3	14	8	0.104
	290	2	7	14	2	2	0.062
	340	2	5	17	3	0	0.059
速度 /mm·s^{-1}	6.67	4	6	11	6	0	0.058
	10.00	4	4	11	4	4	0.070
	13.33	1	2	12	8	4	0.084
悬距 /mm	2	4	4	11	7	1	0.065
	3	3	6	11	3	4	0.069
	4	2	2	12	8	3	0.079
磨料流量 /g·s^{-1}	6.67	3	4	11	7	2	0.070
	8.33	3	5	8	8	3	0.073
	10.00	3	3	14	4	3	0.070

5）切口性质及参数选择　为了评价磨料水射流切割表面涂层金属板产生的切口总体性质，把上述分析和规律归纳成表 5.4-11。前述的四个加工参数变化对切口表面质量提高或降低的趋势用定性的等级来评价。其中，表面粗糙度显示了与优化水压力有关的最佳值，还表示了悬距增加导致所有项切口质量均变差的趋势，因此，悬距应尽量选择小些。

表 5.4-11 加工参数对应的切口质量

	水压力	悬距	磨料流量	移动速度
切宽	增大	增大	不明显	降低
锥角	不明显	增大	不明显	增大
表面粗糙度	最小	增大	降低	增大
毛刺大小	降低	增大	不明显	增大

在实验参数范围内，磨料流量对切口形状和毛刺无明显影响，但稍微影响粗糙度的大小。除非表面质量是主要因素，从经济性考虑应采用小流量磨料，射流增加移动速度导致表面粗糙度、锥角和毛刺的增大以及切宽度减少。无论如何，射流移动速度直接与生产率成正比，在不考虑切口质量时应尽可能选择高的移动速度。

同时，水压力对切口的性质影响是最受关注的，水压增加导致切宽直接增大和毛刺的减小，而对锥角的影响不明显，随水压力的变化有最小的表面粗糙度。当然，优化水压力取决于其他加工参数。研究表明，优化水压力在 240 ~ 340 MPa之间，见表 5.4-10。此时的加工表面质量好，产生的毛刺小。在保持切口质量允许的前提下，应选用较大的移动速度。如果切宽，锥角可以预计，还需要注意在磨料水射流工艺设计和加工计划中，通过控制加工喷嘴的入射角度，考虑这些切口性能参数的补偿。同样，在切割前预计出表面粗糙度将有助于改进有关加工参数。因此，建立经验、半经验和理论预测模型用于切口性质是很重要的有实际的工作。

6）切口性质经验公式　采用回归分析建立关于切口性质与加工变量之间关系的经验公式，由于毛刺形成被处理为分组形式，所以经验公式的建立根据四组主要加工参数用于确定与加工性能例如，切宽，锥角和粗糙度的关系。采用软件 SPSS 进行回归分析，对于每 3 个量进行 5 种不同模型检验，置信度为 95% 。它们是线性，指数，乘方，对数，开平方 5 种模型检验。从检验系数（R^2）看出，用开方模型时 R^2 最大，对应三个变量分别为 93%、93%、88%。因此，深入分析开方模型，采用四因素实验，需要 15 个估计参数满足开方模型和结果模型。结果模型可能对实际应用比较太复杂，所以采用逆推方法简化切口宽度，锥角和表面粗糙度三个关系式分别为：

上切口宽度

$$W_t = 1.554 + 0.019P + (4.33Sd + 68.4VS_d - 1.071VP + 4.33S_dP - 0.3216P^2)10^{-4} \tag{5.4-49}$$

切口锥角

$$Q = \arctan[-1.067 + 0.008P - 12.72m_a - (4.734VP + 233.22m_aS_d + 114.36VS_d - 1.363P^2 + 72.576V^2)10^{-5}] \tag{5.4-50}$$

加工表面粗糙度

$$R_a = 34.506 - 0.221P + (240V - 55.452VS_d + 5S_dP - 60m_aSd + 0.3717P^2)10^{-3} \tag{5.4-51}$$

从式（5.4-49）~式（5.4-51）中，可以得到切口宽度，三种简化方程的检验系数 R^2 分别为 91%、89%、86%，其 F-检验很好表明了三种模型的有效性，。同样，T-检验表明了加工变量和切口质量之间（3 种切割性能）有很好的线性关系，比较预测模型和经验公式表明，结果与实验数据符合一致（结果所建经验公式可用来估计在给定氛围的加工条件下切口性质）。

4.3.2 磨料水射流切割工程陶瓷

新开发生产的工业陶瓷有许多固有的特点，如高硬度、耐蚀性、耐磨性和低的电磁感应性。所以被不断应用于光学、电子、机械和生物工程等领域。但，由于其特殊的机械性能，对传统加工技术来说，陶瓷属于难加工材料。此外，依据切割精度，质量和效率等高性能切割的要求，需要利用先进切割技术，例如磨料水射流切割技术。

过去多年的研究和使用磨料水射流切割各种工业陶瓷的实践表明，磨料水射流切割技术是用于加工工程陶瓷材料的最有效手段之一。

1）蚀除机理　总体上脆性材料的去除是通过粒子冲击



产生微观裂纹的形成，扩展和成核的过程来实现的。裂纹的性质、几何特征和去除过程通常包括锥形的、横向的、径向的和晶界裂纹等形式；还包括晶粒间的，穿晶界间的和环形裂纹的微破坏及其混合式破坏形式的去除。

用磨料水射流技术加工氧化铝陶瓷材料，选择部分切割表面在 SEM 下观察研究，发现射流移动速度低于 0.083～0.33 mm/s 范围时，磨料对材料加工表面最明显的损坏是由于塑性流动和亚表面变形形成环形裂纹的去除过程，这是由于高速粒子冲击的结果。在粒子冲击陶瓷材料过程中，粒子的高速冲击使材料表面的局部应力迅速升高，包括切削热的快速累积和陶瓷材料的导热性差使局部温度升高导致材料软化，因而引起局部一定程度的塑性变形和高应变率。这个过程主要产生塑性变形而没有明显的径向或横向裂纹损坏形成的蚀除过程。

当射流移动速度调整在 1～2.33 mm/s 范围内切割材料时，观察发现由于粒子的冲击作用在冲击区及其周围有许多裂纹形成并扩展到材料内部，因此，微观裂纹和晶界裂纹是这种移动速度切割条件下的材料主要蚀除模式。

Zeng 等认为材料的总去除率是塑性流动和网格裂纹两种磨蚀的总和。随着材料脆性的增大，粒子冲击的初期就可能立即产生裂纹，甚至产生包括塑性流动、环形裂纹和微碎屑引起的磨蚀。从另外地研究显示，从原始裂纹到塑性流动和变形磨蚀的过程是：由于射流移动速度降低可以被看作是射流对材料局部作用的能量密度相对增高，所以高能量密度也会导致局部温升并引起塑性流动和变形磨蚀。

2）切口轮廓和形状　磨料水射流可能产生通切口和不通切口两种类型。总体上切口上部比切口下部宽，因而有切口锥度形成。如前面所述，两边切口壁形成的夹角称之为切口锥角，这个特点对通切口和不通切口都是适用的。加工脆性材料与塑性材料明显不同，磨料水射流切割陶瓷过程在切口入口处无明显的圆角，在切口出口处也无明显毛刺。

一般情况下，对于不通切口在切口底部总有一大“袋”状的形状产生。对于不通切口壁倾角分成几段，在切口上部锥角较大，在中部锥角较小并保持以下部分几乎不变到第三段。所以切口表面可以被分成三个区：切口上部光滑区，特征为表面没有明显纹路和麻点，切口中间区表面特征是有明显的纹路但无麻点，切口下部区域特点是有大量的凹坑。放大照片还显示在切口表面明显存在有光滑区域与纹路区的分界线。上部切口光滑区域是切削磨蚀区，加工过程主要是由于粒子的小角度冲击产生的材料去除。切口下部区域的加工蚀除主要是由于粒子的大角度冲击产生变形磨蚀的过程。对于不通切口，变形磨蚀与射流向上反射有关，切口中间区从切削磨蚀区到变形磨蚀区的转换过渡小于总穿透深度的15%。

与切割塑性材料不同，磨料水射流切割脆性材料时，随水压力和磨料流量增加以及射流移动速度的降低切口宽度稳定增大。通过这三个加工参数改变上切口宽度基本参数，虽然，悬距也对上切口宽度有明显地影响，例如，当悬距从 2 mm 增加到 5.5 mm 时，上切口宽度大约增加 50%，因为射流的有效直径在材料上表面增大，但是，无论是从加工性能还是从经济性方面，悬距都应该选择得尽量靠近工件表面。

实验研究还发现切口锥角随移动速度和悬距增大而增大、随水压力降低而增大，磨料流量的变化对切口宽度和切口锥角的影响都不明显。因此，当射流切入工件时，较高的射流移动速度和较大悬距条件下，磨料水射流表现为对整个切口宽度影响减小而形成较大的切口锥度。相反，值得重视的是较高水压力可以更有效地切割材料和产生较小的切口锥角。

3）切深和光滑切深　实验研究氧化铝陶瓷，水压力和射流移动速度对切割深度有明显影响，如图 5.4-36 所示。

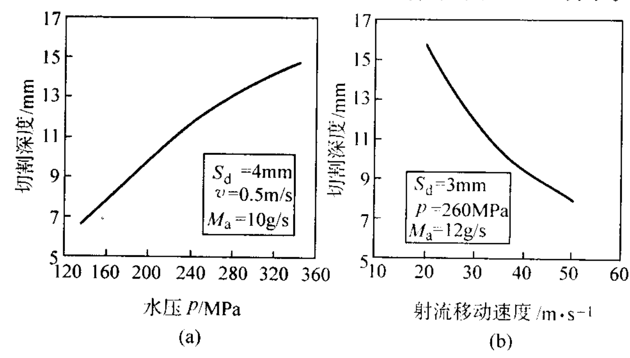


图 5.4-36　水压和移动速度对穿透深度的影响

当水压力从 138 MPa 增加到 345 MPa，射流移动速度从 0.83 mm/s降低到 0.33 mm/s 时，磨料水射流切割脆性材料穿透深度增加一倍。反映出两个主要加工参数对穿透深度影响。其中，悬距对切割性能的影响同切割塑性材料的趋势一样有较大影响，同样应该尽量选择较小的悬距。

4.3.3　磨料水射流切割有机复合材料

有机复合材料（PMC）由于它优越的物理力学性能以及经济性的因素正被广泛用于各个领域且有不断增加的趋势。这种材料用传统加工方法，例如：用带锯切割质量不高、效率低、切口形状难以调整；用激光切割附加有毛刺和热影响及切割前沿的热损伤。已进行的实验、计算研究表明磨料水射流切割有机复合材料的方法有许多优点。

1）实验　实验切割尺寸为 300 mm × 300 mm，厚 16 mm 的有机复合材料板试件，具体材料是碳纤维增强树脂为基体的浸透叠层板，该材料在现代工业中得到广泛应用，它的主要物理力学性能如表 5.4-12 所示，其他条件与切割金属板时的实验条件相同。

为了控制试验条件和参数，主要考虑和调整容易实现的动态参数，分别是水压力，射流移动速度和磨料流量，每个参数采用 4 个水平进行试验，水压力为 230、280、330、380 MPa，移动速度为 6.67、16.67、26.67、36.33 mm/s，磨料流量为 1.67、3.33、5.00、6.67 g/s，悬距只选一个水平，保证不接触试件的前提下尽量靠近试件，确定为 4 mm，射流入射角为 90°，切割长度为 60 mm。

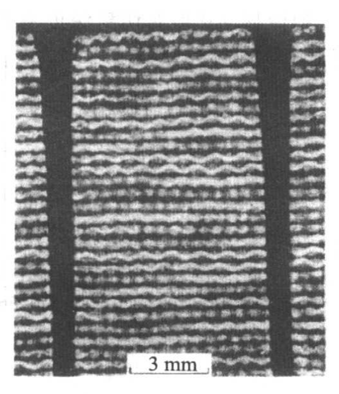
表 5.4-12　试件材料主要性能

冲击强度	110 MPa
压缩强度（正常区域）	290 MPa
压缩强度（边缘区域）	210 MPa
剪切强度	100 MPa
最大工作温度	130℃

其他参数保持常数，一级水流喷嘴直径为 0.33 mm，二级混合、加速喷嘴直径为 1.02 mm、它的长度为 76.2 mm，磨料采用 80# 石榴石砂。

2）切割性能与分析　有几种评价指标可以用于评价磨料水射流切割性能，在此，以切口轮廓和形状、表面粗糙度以及切割深度为主要研究对象。

在实验参数范围内观察切口有两种切口产生，一种称为通切口，一种称为不通切口，如图 5.4-37 所示。当提供给射流足够能量（例如，较高水压力和较低射流移动速度）时，则形成通切口。其切口性质是入口较宽，然后逐渐减小直至出口处形成切口锥度，试验表明，锥度随移动速度增加而增大，但随水压力和磨料流量的增大而减小。



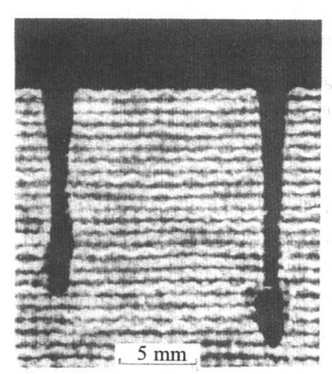


图 5.4-37　通切口和不通切口的轮廓

当射流不能穿透样件时，形成不通切口，其切口形状上部与通切口类似，但在其底部产生一较大的“袋”状区域，且形状不规则。射流移动速度对“袋”状的几何形状影响很大。当射流以较低速度移动时，粒子与工件的作用时间相对较长，产生较大的“袋”状区域。即当射流低速移动、采用较大水压力和较大磨料供给量时，这种“袋”状区域更为明显。如果，采用射流高速移动和较小磨料供给量时，则由于较小的粒子冲击作用，形成的不通切口底部宽度很小。

分析加工参数对切口深度的影响时发现，该项性能指标的大小随水压力的增加相应增大，但增长率在水压力达到一定值时开始下降。在较高水压力下磨料之间的碰撞和射流能量损失被看成是切割深度增长率下降的主要原因。在实验参数范围内，切深随磨料流量增加而增大，随射流移动速度增加而减小，原因是这两个加工参数的作用改变了粒子冲击材料密度的结果。

在切口入口边缘平行于切口有一条光滑区域存在，而在通切口出口边缘呈现与切割条件有关的锯齿状，随射流能量进入材料出口端的锯齿状现象降低。通过选择恰当的加工参数可以得到较好的出口边缘，通常是较高水压力，较低射流移动速度和较高的磨料流量，同时，切割表面质量也比较好。

3）加工表面性能　增加水压力使得粒子的能量增大进而导致光滑切深的增加，该参数的作用相对比射流移动速度和粒子流量对光滑切深的增长程度要小。但增加水压力对从上边缘至 2 mm 光滑区域表面粗糙度的变化趋势与射流移动速度、粒子流量的影响趋势相似，所有切割表面粗糙度在 4 ~ 13 μm（平均 R_a）范围内。检测发现纹路区和波纹区，在边口壁一边为波峰时对应于另一边为波谷底，这种现象被解释为射流在切割平面内的平面振动引起的结果，有专家提出射流底部的磨料分布不稳定性和波动引起纹路区的形成，目前的研究发现，随切割深度的增加纹路的幅度也增加。降低波纹幅度的工艺措施是通过降低射流移动速度，增加水压力和磨料流量来实现。

4）剥离　剥离脱落是叠层式连接板层与层之间的缺陷现象。当粒子垂直冲击叠层式复合材料时，在层与层之间可以看到影响工件整体性的裂纹。剥离现象是磨料水射流加工这种复合材料时要避免的重要特性。这种现象与材料层与层之间的连接强度及磨料水射流切割前沿射流的冲击性质有关。还有实验表明在一定切口深度情况下，当射流压力足够高时，磨料水射流的反射将引起层与层之间的分裂。因此，加工参数对裂纹的产生影响很大，如果参数选用合理，可以避免分裂现象的产生。这种现象主要发生在不通切口，所以射流压力是关键因素，必须避免射流反射来防止剥离现象。针对不同材料有不同的加工参数和结果，对应于不同的切口性能，可以通过实验建立实验经验公式或理论数学模型用于指导生产实践，但是更一般性和更普遍性的数学物理模型急需建立。目前还没有裂纹与切割参数之间关系的数学模型，此项工作是十分有意义的。

5　提高磨料水射流切割性能的方法

尽管磨料水射流切割技术已用于各种材料的加工，特别是在轮廓成形和加工难加工材料等方面优于许多其他切割技术，但它在切割深度和切割质量方面能力是应用磨料水射流技术的主要问题。大量研究和开发工作对掌握和改进磨料水射流切割性能有意义，例如表面粗糙度、纹路和切深。其中主要是切割尺寸和切割质量等性能的改进。

为了增加总切割深度，光滑切深及减少切口锥角和降低表面粗糙度，应选择射流低速移动和高压射流，包括水压的使用高达 690 MPa，但这个组合参数从经济性观点不受欢迎，所以进行了许多开发性研究工作，目的是提高磨料水射流切削性能。在这项研究中，采用射流在切割平面内前倾入射角；控制喷嘴振动技术和多次切割等方法。研究结果证明这些方法都是在几乎不增加加工成本的前提下，改进磨料水射流切割性能和能力的有效手段，当然还有其他方法如改进设备、改进控制等。这里重点从加工工艺及经济性的角度，介绍下面三种切割技术对提高材料切割性能的原理、方法和结果。

5.1　射流入射角的实验优化

前面讨论过当磨料水射流切入工件，由于拖后角的变化主运动切割方向在切割前沿发生变化，导致粒子去除材料的能量减少。所以提出射流冲击角预置前倾的改进方案，目的是补偿拖后角以改善切割性能，这样射流冲击角的调整设定在射流原始角（即正冲击）与待切工件表面之间，改变冲击角达到改善射流冲击效果和提高蚀除性能的目的。为评价和比较该技术的有效性以及优化切割参数，研究切割金属涂层复合金属板，氧化铝陶瓷和有机聚合物复合材料（见前一节中的加工实例）等相同材料；选用设备条件和加工条件等，例如喷嘴尺寸，磨料材料及型号也相同。切割实验 87% 氧化铝陶瓷，厚度在 2.7 ~ 25.4 mm 范围之间，水压为 290 ~ 380 MPa，移动速度为 0.25 ~ 0.83 mm/s，磨料流量为 9.6 ~ 15.2 g/s，悬距在 2 ~ 6 mm 之间，射流冲击角在切割平面内从 60° ~ 100°范围内调整，每个冲击角度还需 5°的附加量。这里 90°表示正交切割条件，调整时，使喷嘴轴线与移动前进方向夹角小于 90°，大于 90°的为射流入射角后倾。

切割复合材料，试验主要性质如表 5.4-12 所示，试件尺寸 300 mm × 300 mm，厚度为 20 mm，切割条件：水压力 280、330、380 MPa，移动速度 16.67、26、67、36、67 mm/s，悬距为 4 mm，磨料流量为 10 g/s，射流冲击角从 50° ~ 90°。切割氧化铝陶瓷板结果表明，射流冲击角对切深有较大影



响，优化冲击角大约在 80°～85°，喷嘴前倾 5°～10°，采用优化射流冲击角的实验结果是提高磨料水射流切深达 30%，60°冲击角比正交切割提高 8%，当冲击角在 70°～75°，拖后角减少到 0°。该实验结果证明射流冲击角的前倾与优化对磨料水射流切割性能，特别是切割深度和拖后角的改进作用非常明显。

图 5.4-39 表示切割有机复合材料冲击角对切深和表面粗糙度的影响，能够看出冲击角从 50°～80°时切深增加 25%，但增长率随角度增加而减少。大量试验表明，当角度超过 80°时，切深减少，所以 80°为该切割条件下的最大切深。穿透深度增大的原因是，射流冲击角的变化补偿了射流拖后角引起的粒子能量损失，在切口下部区域，粒子的能量在切线或切割方向上相对增加。

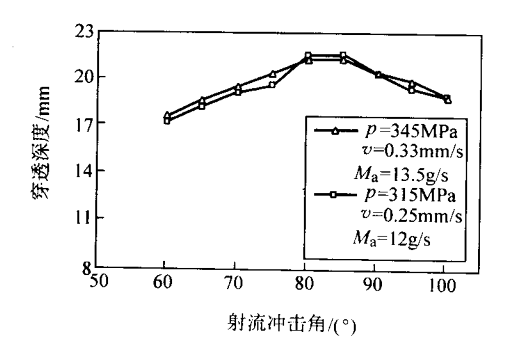
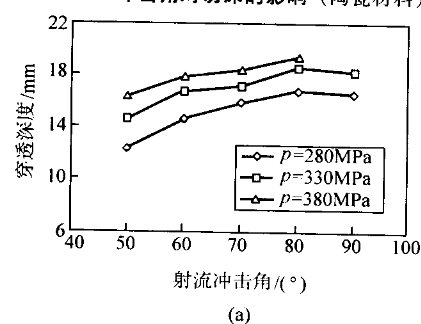
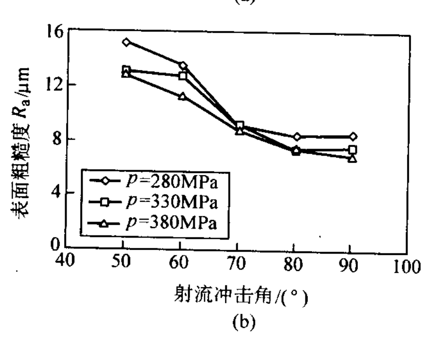


图 5.4-38　冲击角对切深的影响（陶瓷材料）



(a)



(b)

图 5.4-39　冲击角对切口性能影响

从实验检测和上述分析得出，冲击角对切口上部光滑切深无明显影响；而当冲击角从 50°～70°变化时，射流切割明显降低切口上部光滑切深区域的表面粗糙度达 50%，这个趋势在冲击角增加到 90°时，降低表面粗糙度的现象消失。这是由于小冲击角作用减少了粒子正面冲击，即减小了粒子冲击变形磨蚀的作用和增加了粒子切削磨蚀作用，从而降低了表面粗糙度。

在试验切割有机复合材料时，射流冲击角从 50°～90°变化，还发现上切口宽度仅有 0.1 mm 的变化，因此，认为射流冲击角的变化对上切口宽度的影响很小。从上述趋势可以得出射流结构对材料的切割性质与切口宽度影响很大。类似地，切口锥角有同样的趋势，原因是射流结构或能量分布决定切割锥度和宽度而射流冲击角对切口锥角的大小影响不大。

实验研究确定射流冲击角 80°为优化的加工参数，采用 80°角切割陶瓷材料时，穿透深度相对 90°切割角时增加深度 8%。但采用 80°取代 90°冲击角切割有机复合材料时，射流穿透深度和表面粗糙度处于临界状态。

5.2　喷嘴的控制振动

由磨料水射流加工产生的表面由上部的光滑区和下部的纹路区组成，随着射流移动速度增加，上部表面粗糙度增大及下部波纹和纹路增大。切割头的振动切割可以改变纹路的成形及变化规律。这个现象进一步解释了磨料水射流切割的内在和外在因素的影响与关系。所以在磨料水射流切割过程中，附加一射流振动扫过切削表面，表面粗糙度和纹路能够被明显减小。Veltrup 第一个介绍了采用喷嘴振动技术提高磨料水射流切割性能的实验研究，该技术成功地提高了几种材料的磨料水射流加工表面质量。

实验研究中，使喷嘴像钟摆一样沿切割表面向前及向后振动，以预先设定的频率和角度叠加到射流的移动运动中，水压力为 345 MPa，磨料流量为 12 g/s，悬距为 2 mm，以不同频率改变射流移动速度和振动参数时，其中振动角（幅度）从 5°～30°变化，移动速度从 0.17～0.5 mm/s 范围内调整，分析振动参数对光滑切深的影响，图 5.4-40 表示了其实验研究结果，在实验条件范围内切口两边平均光滑切深随振动角度的增加而增大，当振动角超过 20°时，切口壁的一边光滑切深增加 1 倍（与 90°冲击角相比），而另一边表面质量开始变差。解释其原因主要是由于振动幅度增加产生系统的不平衡振动造成的。因此，实验优化振动角在 15°～20°之间，如果切口壁一边有效的话，振动角可达 30°。

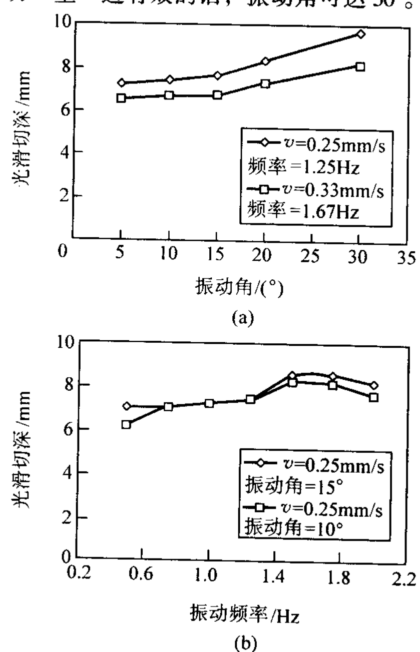
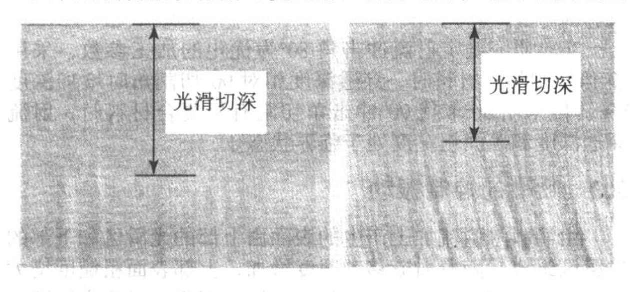


图 5.4-40　振动参数对平均光滑切深的影响

图 5.4-40b 所示的是平均光滑切深开始时随射流振动频率增加而增大，当达到频率最佳值后平均光滑切深的深度随射流振动频率增加反而下降，降低原因的仍然是切割头在高频振动下产生系统不平衡振动造成的。综合频率正面和反面作用，实验优化磨料水射流振动频率的简化计算办法为：射流振动频率等于其移动速度的 6 倍，例如，移动速度为 0.5 mm/s时的优化振动频率为 3 Hz。

同样地，射流切割的振动和非振动状态比较，见图5.4-41。采用喷嘴振动切割可使光滑区切深增加，增加幅度超过

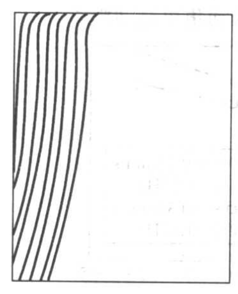


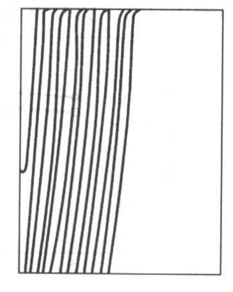
(a)喷嘴振动　　(b)喷嘴无振动

图5.4-41　光滑切深的比较

30%，即使在下部纹路区，拖后角和纹路也被明显降低，当切割碳钢和铝合金纤维增强复合材料时得到了类似的结果，光滑切深增强达40%。

明显地，喷嘴振动技术可以增加磨料水射流的总穿透深度，增大的原因是粒子的扫描运动不仅改善了粒子的运动轨迹及其与靶材表面的作用，而且减少了粒子间的干扰，易于粒子的切削作用。例如，磨料水射流切削碳钢和铝合金时，喷嘴振动切割可降低表面粗糙度，在喷嘴高速移动2.5～5 mm/s切割塑性材料时，振动角为3°～7°，频率为4～6 Hz是较佳参数。观察研究揭示喷嘴振动增加切深的基本机理，研究是在透明玻璃材料上进行。用摄像机记录切口形成过程和粒子流与材料的相互作用。发现，随着喷嘴振动作用于切割表面粒子的运动轨迹比无振动切割时的粒子运动轨迹陡峭得多，在切割方向产生更大的粒子碰撞能量，有利于更深的切割。图5.4-42所示为磨料水射流和工件表面轨迹轮廓。





(a)磨料水射流切割　　(b)喷嘴振动磨料水射流切割

图5.4-42　磨料水射流和工件表面轨迹轮廓

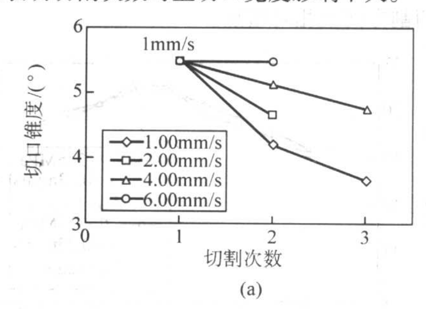
5.3　多次切割

1）实验　实验是在Flow International切割机上进行的，一级形成射流水喷嘴直径为0.33 mm，二级混合，加速喷嘴长为76.2 mm，直径为1.02 mm，磨料采用80＃石榴石砂，流量为8.33 g/s，悬距为4 mm。在两套实验中进行的实验研究，第一套射流冲击角保持90°，改变其他参数，试件厚为12.7 mm的氧化铝陶瓷板，改变水压，移动速度和切割次数。

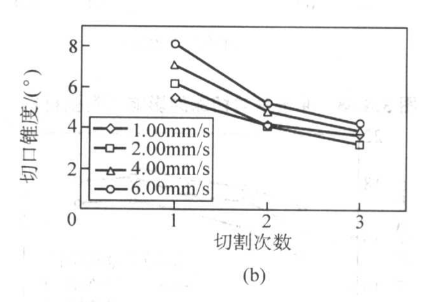
此外，考察射流移动方向变化对其切割性能的影响，有些实验保持所有各次切割同样的移动方向，而另外一些试验变化移动方向用于考查连续的多次切割。第二套试验射流冲击角为80°，以不同的射流移动速度组合。该试验研究有意于多次切割和附加角度切割，板厚为25.4 mm，水压为345 MPa，射流移动方向在多次切割的每次切割中保持相同的方向。

为得到射流冲击角、水压和悬距在单次切割的优化值，确保选择适当的实验切割参数。当射流移动速度选择恰好为单次切割能切通材料时，而为便于多次切割与单次切割对比研究，计算选择好多次切割总和恰好等于单次切割切透的条件。尽管磨料流量没变，它不影响单次与多次切割切割性能的比较。从这个实验中，总共144次切割66个25 mm长的槽，切割性能检验总切深，光滑切深，切口宽，切口锥度和表面粗糙度。

2）切口锥角轮廓　切口锥度随多次切割次数的增加而稳定减小，如图5.4-43所示。在单次切割中，移动速度对切口锥度影响很大，而在多次切割中影响减小。例如，在移动速度范围内，切口锥角变化从原来的2.5°，在1次切割、2次切割和3次切割后减小至1°。从图5.4-43b还可以看到，实验结果表明切割次数对上切口宽度影响不大。



(a)



(b)

图5.4-43　多次切割参数对切口锥度的影响

3）总切深和光滑切深　总切深和光滑切深是磨料水射流切割的两个重要性质，当总切深代表射流切通材料的能力时，希望获得尽可能大的光滑切深或更接近于总的切深，在研究中，很显然总的切深和光滑切深随切割次数的增加而增大，且有趣的是在相同的切割或粒子冲蚀时间内，多次切割比单次切割产生更大的总切深和光滑切深。即在相同的切割时间内，多次切割射流可以快速移动是增加光滑切深的有效方法，换句话说，获得相同的切割性能，采用多次切割所用得切割时间较少；还发现，射流移动速度和其他切割条件不变时，第二次切割产生的切深比比第一次的切深小，依此类推，第三次切深小于第二次切深，这是由于实际悬距在每次切割深后相对增大，降低射流冲击材料的能量的结果，因而减少了每次的切深。

4）表面粗糙度　图5.4-44表示了多次切割和移动速度对表面粗糙度的影响，可以看到表面粗糙度随切割次数增加而降低，这意味着后一次切割对前一次切割的切口壁有抛光作用和去除前一次切割留下的波峰作用，进而，粗糙度 R_a 随射流移动速度增大而增大，这个结果与单次切割的规律相似，从图中同样说明了相同的冲蚀时间，增加切割次数，得到较好的表面质量，例如，在移动速度为2 mm/s时，第二次切割粗糙度 R_a 小于单次切割移动速度为1 mm/s时的表面粗糙度，从另一方面说明了多次切割可以用较少的总切割时间得到同样的表面质量。

图5.4-45和图5.4-46分别表示了多次切割中射流移动方向对切割性能的影响及冲击角在不同移动速度下对表面

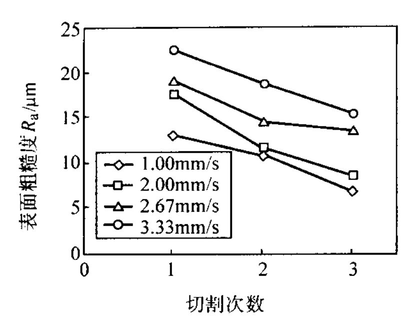
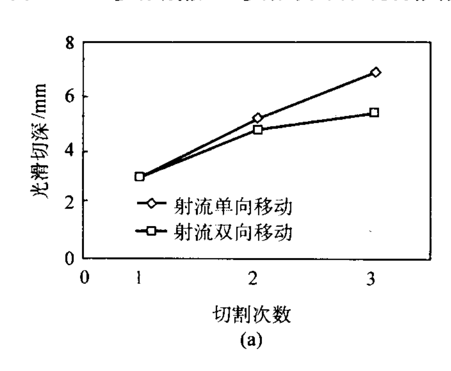


图 5.4-44 多切切割加工参数对表面粗糙度影响



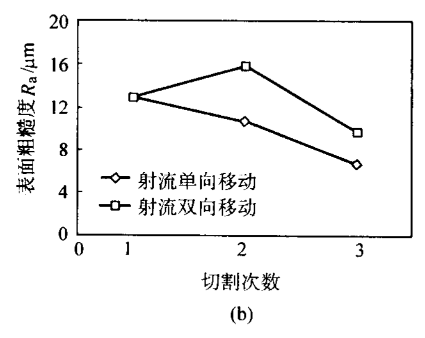


图 5.4-45 射流移动方向对切割性能的影响

质量的影响。实验结果表明了多次切割每次变换方向与控制振动切割有类似的去除高峰的抛光作用，它对切深影响不大。而多次切割的优化实验冲击角在80°左右，此时切割的总深度，光滑切深均有提高，综合多次切割和优化冲击角共同作用总的切深增加达45%，光滑切深达25%。因此，考虑加工参数对表面粗糙度的影响，多次切割可进一步提高移动速度而不降低表面质量。总之，实验结果是在直线移动条件下获得的，目前受切割实验条件的限制没有得出非直线切割实验的结果，对非直线切割及非平面切割还需建立实验装置进一步实验研究，或通过建立更加符合实际切割状态的数学模型，计算分析得到可以指导实际应用的优化参数。

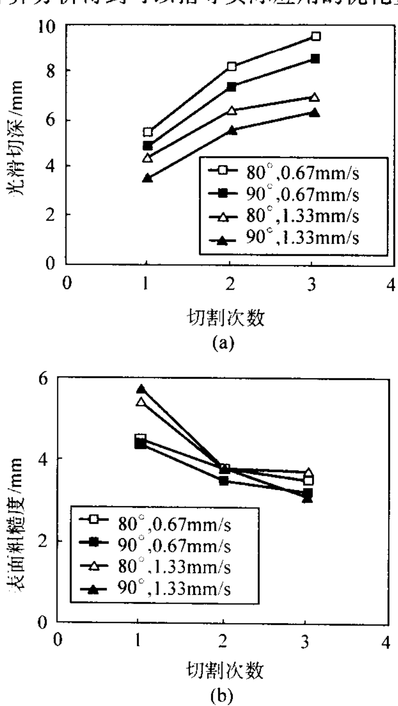


图 5.4-46 射流冲击角对切割性能的影响（多次切割）

编写：王续跃（大连理工大学）
王　军（澳大利亚昆士兰理工大学）



参考文献

1 袁哲俊，王先逵．精密和超精密技术．北京：机械工业出版社，1999
2 胡耀志，黄光周，于继荣．机电产品微细加工技术与工艺．广州：广东科技出版社，1993
3 王先逵．精密加工技术实用手册．北京：机械工业出版社，2001
4 赵万生，王振龙等．国外特种加工技术的最新进展．电加工，1999（5）
5 叶玉堂．激光微细加工．成都：电子科技大小出版社，1995
6 ［日］小原 实 神成文彦等．应用激光光学．北京：科学出版社，2002
7 W.W.Duley.UV Laser：effects and applications in materials science.Cambridge University Press，Cambridge，1995
8 楼祺洪．激光在电子器件工业中的应用．电子器件，1999，3：1～4
9 楼祺洪等．脉冲放电气体激光器（M）．北京：科学出版社，1993
10 M. Haruna，H. Sewai，H. Hishihara，S. Ikunishi. Electron. Lett.，1994，30：412
11 D. B. Chrisey，G. K. Hubler. Pulsed Laser Deposition of Thin Films. JohnWiley and Sons. NEW York，1994
12 C. F. O，R. Buhleier and M. Stutzmann. Appl. Phys. Lett.，1993，52：8001
13 张玉书，张庆有．准分子激光微细加工技术．长春：吉林大学出版社，1990
14 杨臣华，梅遂生，林钧挺主编．激光与红外技术手册．北京：国防工业出版社，1990
15 金友．激光微细加工：新的发展与应用．光机电信息，2001，7
16 巴瑞璋．准分子激光加工的应用．航空制造技术，1998（4）：32～33
17 赵方海等．准分子激光直接切割金刚石薄膜的研究．微细加工技术，1994，(2)
18 楼祺洪．准分子激光及其在微细加工中的应用．电子器件，1994，5：13～19
19 潘开林，陈子辰，傅键中．激光微细加工技术及其在MEMS微制造中的应用，制造技术与机床，2002，3：5～7
20 Glenn Ogura，Bo Gu. Review of Laser Micromaching in Contract Manufacturing. SPIE，1998，3898.
21 Alavi M，Schumacher A，et al. Laser Machining and Anisotropic Etching of < 111 > Silicon for Applications in Microsystems. Micro System Technologies’92，1992
22 黄峻峰．激光微细加工在显示器应用中的新技术和发展．光机电信息，2002，(2)
23 黄庆安．硅微机械加工技术．北京：科学出版社，1995
24 章吉良，杨春生等．微机电系统及其相关技术．上海：上海交通大学出版社，2000
25 秦萌青，李田泽．激光在半导体材料加工中的应用与展望．半导体技术，1998，4：4～7
26 吴国安，邓存熙编译．激光工艺与微电子技术．北京：国防工业出版社，1997
27 甄汉生．等离子体加工技术．北京：清华大学出版社，1990
28 汪泓宏，田民波．离子束表面强化．北京：机械工业出版社，1992
29 徐学革，诸定昌．气体放电物理．上海：复旦大学出版社，1996
30 Smith D L. Thin Film Deposition. New York：McGraw－Hill Inc，1995
31 Orlando Auciello，DanieL Flamm．等离子体诊断．郑少白，胡建芳等．北京：电子工业出版社，1990
32 邓新绿等．利用LIF法诊断微波等离子体鞘层．大连理工大学学报，1997，37（2）：30～36
33 李刘合等．阴极弧离子镀磁过滤器．真空，1999，（3）：14～19
34 刘仲阳等．电子回旋共振等离子体源的特性．核技术，2000，23（10）：707～712
35 叶先科，张开．低温等离子体改性聚合物膜的原理．高分子通报，1991，（2）：76
36 任兆杏，丁振峰．低温等离子体技术．自然，1996，18（4）：201
37 白敏冬等．低温常压等离子体材料表面改性研究．表面技术，1993，22（5）：201
38 李瑛，茅素芳．高分子薄膜等离子体表面改性的研究．功能材料，1995，8（1）：1
39 王雪燕等．低温等离子体接枝聚合用于涤纶织物改性．印染，1997，23（3）
40 吴承康．我国等离子体工艺研究进展．物理，1999，5（2）：50～54
41 张进．低温等离子体技术在表面改性中的应用进展．陕西师范大学学报，1999，33（3）：40～44
42 唐伟忠．薄膜材料制备原理、技术及应用．北京：冶金工业出版社，1998
43 张继世，刘江．金属表面工艺．北京：机械工业出版社，1995
44 高技术新材料要览编辑委员会．高技术新材料要览．北京：中国科学技术出版社，1993
45 师昌绪，徐滨士等．21世纪表面工程的发展趋势．中国表面工程，2001，1：2～7
46 T. S. Sudarshan 著．表面改性技术工程师指南．范玉殿等译．北京：清华大学出版社，1992
47 曲敬信，汪泓宏主编．表面工程手册．北京：化学工业出版社，1998
48 汤宝寅等．9Cr18轴承钢的金属离子加氮离子复合注入处理新工艺．中国表面工程，2000，13（4）：24～27
49 Kazuo Saito and Masatsugu Kaise. Superconductivity and structure of a few－unit－cells－thick Bi－Sr－Ca－O ultra－thin film. Physical Review，1998，5：786～790
50 M. Ghaly and R. S. Averback. Effect of viscous flow on ion damage near solid surface. Phys. Rev. Lett，1994，72：364～367
51 Donald J. Rej. Cost estimates for commercial plasma source ion implantation. J. Vac. Sci. Technol.，B 12（4）Jul/Aug 1994，2380～2387
52 Carter P. Munson，etc. Recent Advances in plasma source Ion Implantation. Ninth International Conference on Surface Modifi-



cation of Metals by Ion beam Sep. 4~8, 1995

53 Jesse N. Matossian. Plasma ion implantation technology at Hughes Research Laboratories. J. Vac. Sci. Technol., (2) Apr/1994, 850~853

54 Morfert, K. Richter. Plasma enhanced chemical vapor deposition of SiN - films for passivation three - demensional substrate. Surf. &Coat. Technol., 1999, 116~119: 622~628

55 Toshiaki YASUI, etc. Plasma Generation and Beam Extraction on Reentrant Cavity - Type Electron Cyclotron Resonance Ion Source. Jan. J. Appl. Phys., 1994, Vol. 33: 4782~4792

56 Toshiaki YASUI, etc. Long Electron Cyclotron Resonance Plasma Source for Reactive Sputtering. J. Appl. Phys. 1996, Vol. 35: 5495~5500

57 Jörg Brutsher etc. Plasma immersion ion implantation using pulsed plasma with d. c and pulsed high voltage. Surf. & Coating Tech., 1997, 93: 197~202

58 V. A. Spassov etc. A high - voltage pulse generation for plasma immersion ion implantation applications. Surface&Coating Tech, 1999, 112: 29~33

59 M. Ueda, etc. Nitrogen Plasma Immersion Ion Implantation of Metals with A 2.45 GHz Microwave source. XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum—Berkeley - 1996

60 Andrea Anders. Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition. A WILEY - INTERSCIENCE PUBLICATION, 2000

61 Anthony J. Perry & Jesse. N. Matossian. An overreview of Some Advanced Surface Technology in Russia. Metallurgical and Materials Transaction A. Vol. 29A, 2/1998, 593

62 Vladimir I. khvesyuk, Piotr, A. Tsygankov. The use of a high - voltage discharge at low pressure for 3D ion implantation. Surface & Coatings Technology, 1997, 96: 68~74

63 J. N. Matossian, R. Wei, J. D. Willians Plasma - based ion implantation and electron - bombardment for large Scale Surface modification of Materials. Surface & Coatings Technologies, 1997, 96: 58~67

64 Dan M. Goebel, Tarzana, Jesse N. Matossian. Ion Implantation and Surface Processing Method and Apparatus. US Pataent, 5212425, May 18, 1993

65 崔琳．离子注入结构陶瓷表面改性技术的研究现状，兵器材料科学与工程，Vol. 22, No2, 3/1999, 68~70

66 R. A. MacGill and I. G. Brown, Plasma and Ion Beam Surface Modification at Lawrence Berkeley National Laboratory: Applications. 5th Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (2000). P370

67 J. H. Keller. Inductive plasma for plasma processing. Plasma Sources Sci. Technol, 5 (1996), 166~172

68 郭华聪．新型微波等离子体源．微细加工技术，3/1993, 33

69 S. Schoser, J. Forget, and K. Kohlhof. PIII - assisted thin film deposition. Surface & Coatings Technology, 93 (1997), 339~342

70 Andreas W. Momber and Radovan Kovacevic, Principles of Abrasive Water Jet Machining. Springer Press, 1998

71 Jun Wang. Abrasive Waterjet Machining of Engineering Materials. Trans Tech Publications LTD, 2003

72 Radovan Kovacevic, M. Hashish, et al. State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining. J. Manuf. Sci. Eng., 119 (1997)

73 M. Hashish, Comparative Evaluation of Abrasive liquid Jet Machining Systems. J. Eng. Ind., 115 (1993)

74 A. A. El - Domiaty, M. A. Shabara, et al. On the Modelling of Abrasive Waterjet Cutting. Int. J. Adv. Manuf. Tech., 12 (1996)

75 E. Ness and R. Zibbell. Abrasive and Erosion of Hard Materials Related to Wear in the Abrasive Waterjet. Wear 196 (1996)

76 M. Hashish. Observation of Wear of Abrasive Waterjet Nozzle Materials. J. of Tribology. Trans. ASME, 116 (1994)

77 H. Hocheng and K. R. Chang. Material Removal Analysis in Abrasive waterjet Cutting of Ceramic Plates. J. Material Processing Technology, 40 (1994)

78 J. Zeng and T. J. Kim. An Erosion Model for Abrasive Waterjet Milling of Polycrystalline Ceramics. Wear, 199 (1996)

79 盛晓敏，邓朝晖．先进制造技术．北京：机械工业出版社，2003

80 刘晋春，赵家齐．特种加工．第二版．北京：机械工业出版社，1995

81 金庆同等．特种加工手册．北京：机械工业出版社，1996

82 顾文琪．电子束曝光微纳加工技术．北京：北京工业大学出版社，2004

83 张国俊．电子束曝光系统：实用电子技术与产品．北京：北京电子工业出版社，1993

84 吴桂君，彭开武，张福安．缩小投影电子束曝光机掩模特性分析．第十一届全国电子束、离子束、光子束学术年会，2001，10

85 顾文琪，张福安．一种新型的电子束投影成像曝光技术．第十一届全国电子束、离子束、光子束学术年会，2001. 10

86 王绍钧．一个平面区域的部分．微细加工技术，1994 (2): 9~15

87 李力钧．现代激光加工及其装备．北京：北京理工大学出版社，1995

88 邱元武．激光技术和应用．上海：同济大学出版社，1997

89 王家金．激光加工技术．北京：中国计量出版社，1995

90 闫毓禾，钟敏霖．高功率激光加工及其应用．天津：天津科学技术出版社，1994

91 浜崎正信（日）．实用激光加工．北京：机械工业出版社，1995

92 梁桂芳．切割技术手册．北京：机械工业出版社，1997

93 刘顺发，陈洪斌．激光加热物体的三维模型计算．光子学报，2000，3：267~270

94 Miyamoto I, Maruo H. The Mechanism of Laser Cutting. Welding in the World, 1991, 29 (9/10): 283~294.

95 M. S. GroB, I. Black, W. H. Muller. 26th European Conference on Laser Interaction with Matter. Proceedings of SPIE, Vol. 4424 (2001): 236~239

96 俞宽新，江铁良，赵启大．激光原理与激光技术．北京：北京工业大学出版社，1998

97 范安辅，徐天华．激光技术物理．成都：四川大学出版社，1995

98 史晓强．低碳钢板的激光切割．激光技术，1998. 12: 343~345

99 杜汉斌，刘建华，胡席远等．激光切割热传导损失数值

计算方法．机械工程学报，2001，5：72～77

100 Lim C K. Numerical modeling of reactive gas assisted laser cutting of metals: [Ph. D. Dissertation]. Lowa State University, 1995: 123～131.

101 Powell J. Laser Cutting. Berlin: Springer, 1993: 215～225.

102 李好平．激光加热温度场的简化计算．激光技术，1991．4：122～126．

103 李瑜煜，林照，邹燕成．激光加工点、线、面热源温度场计算机模拟．冶金丛刊，1998，2：41～44

104 Dilthey U et al. Laser Cutting of steel－cut quality depending on cutting parameters. Welding in the world, 1992, 30 (9): 257～278

105 Hus M J, Molian P A. Thermochemical modeling in CO2 laser cutting of carbon steel. J. Mat. Science, 1994, 29: 5607～5611

106 周炳琨，高以智，陈稠嵘，陈家骅．激光原理．第4版．北京：国防工业出版社．2000

107 陈钰清，王静环．激光原理．浙江：浙江大学出版社，1992

108 邱元武．激光技术和应用．上海：同济大学出版社，1997

109 刘江龙，邹至荣，苏宝嫆．高能束热处理．北京：机械工业出版社．1997

110 张永康．激光冲击强化提高航空材料疲劳寿命的研究．南京航空航天大学博士学位论文，1995，4

111 中国机械工程学会焊接学会编．焊接手册：第1卷，焊接方法及设备．北京：机械工业出版社，2001

112 邹莱莲 主编．焊接理论及工艺基础．北京：机械工业出版社，1994

113 李力钧 主编．现代激光加工及其装备．北京：北京理工大学出版社，1993

114 王文翰 主编．焊接技术手册．郑州：河南科学技术出版社．2000

115 何德孚 主编．焊接与连接工程学导论．上海：上海交通大学出版社．1998

116 Steen W M. Laser Material Processing. London: Springer－Verlag, 1991

117 赵熹华 主编．焊接方法与机电一体化．北京：机械工业出版社，2000

118 关振中 主编．激光加工工艺手册．北京：中国计量出版社，1998

119 刘金合 主编．高能密度焊．西安：西北工业大学出版社，1995

120 曹明翠，郑启光等．激光热加工．上海：华东理工大学出版社，1995

121 李志远，钱乙余等．先进连接方法．北京：机械工业出版社，2000

122 赵熹华 主编．焊接检验．北京：机械工业出版社，1993

123 周振丰 主编．焊接冶金学：金属焊接性．北京：机械工业出版社，1995

124 冯雷．高速 CO2 焊成形机理与稳定性研究［博士学位论文］．哈尔滨：哈尔滨工业大学，1999

125 Poueyo－Verwaerde, Afabbro Ret al. Experimental study of laser－induced plasma in welding condition with continuous Laser. J. Appl. Phys, Nov, 1993

126 肖荣诗，左铁钏．中等功率 CO2 激光深熔焊接光致等离子体的控制．激光与光电子学进展（增刊），1996 (7)

127 刘金合等．航空发动机前后冷气导管 CO2 激光焊接研究．材料工程，1999 (6)

128 周昌炽，陈鹤鸣．激光改善表面的抗腐蚀性质．电加工，1990，155 (1)：1～5

129 杨永强，阎毓禾．送粉激光熔覆 WC－Co 工艺及其气孔研究．金属热处理学报．1992，13 (2)：33～36

130 刘江龙．铸铁表面激光镍基合金化的凝固研究．金属热处理学报，1992，13 (23)：8～24．

131 周昌炽．激光表面优化处理．电加工，1990，159 (5)：21～24．

132 刘江龙．激光与陶瓷材料交互作用的研究与应用现状．激光技术．1991，15 (2)：111～117．

133 ［日］安永畅．最近的表面改性技术．陈赛克译．国外金属加工．1990，(1)：52～57

134 ［日］浜崎正信．实用激光加工．陈敬之译．北京：机械工业出版社，1995

135 荣烈润．激光表面改性技术的应用现状与进展．国外激光，1993，2：27～31

136 陈树林．激光表面强化技术．电加工，1992，169 (3)：10～13．

137 周建忠，张永康．激光加工技术在汽车车身制造中的应用．电加工与模具，2000，(4)：35～36．

138 张莹，周建忠，戴亚春．激光技术在模具制造中的应用研究．模具工业，2001，(4)：40～43

139 周建忠，杨超君，杜生亚．激光强化技术提高模具使用寿命．电加工与模具．2000，(1)：44～45

140 徐洪烟，周建忠，袁国定．激光热处理提高材料寿命的机理．电加工与模具，2000，(5) 28～30

141 周建忠，袁国定，杜生亚．应用激光强化技术提高覆盖件模具寿命．模具工业，2000，(4)：52～54．

142 杨国成，周建忠，张永康．激光淬火提高气缸套的耐磨性．江苏理工大学学报．2000，21 (5)：17～21．

143 周建忠，张永康，杨继昌．球铁曲轴激光淬火强化技术研究．农业机械学报，2001，(3)：115～118

144 周建忠，杨继昌．齿轮激光淬火工艺及性能研究．农业机械学报，2002，33 (5)：93～96

145 H. Arnet, F. Vollertsen. Extending laser bending for the generation of convex shapes. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1995, 209: 443～445

146 M. Geiger. Synergy of laser Material Processing and Metal Forming. Annals of the CIRP, 1994, 43 (2): 563～569

147 M. Geiger. F. Vollertsen and G. Deinzer. Flexibles straithening of car boddy shells by laser forming. SAE Special Publications, 1993 (994)

148 F. Vollertsen, M. Geiger. and W. M. Li. FDM and FEM Simulation of laser forming: a comparative study. Advanced technology of plasticity, erited by Z. R. Wang, Y. He, 1993, 3

149 T. Hennige, S. Holzer, F. Vollertsen. On the working accuracy of laser bending. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 17: 435～445

150 Trumf Ltd. The heat is on for laser profiler. Sheet Metal Industries, 1997, (1): 13～15

151 李纬民，李春科，刘助柏．板料成形新工艺—激光弯曲．锻压技术，1993 (6)

152 季忠，刘庆兵，吴诗享．板料的快速激光成形技术及其应用．中国机械工程，1996，7 (6)：54～56

153 王秀凤，胡世光，陈光南．板料激光成形技术．锻压



技术，1998，(6)：32～35

154 管延锦，季忠，孙胜等．激光诱发的热应力成形技术及其应用．航空工艺技术，1999，(4)：30～35

155 季忠，吴诗惇，李淼泉．板料激光成形时的温度场研究．塑性工程学报，1997，(6)

156 管延锦，季忠，孙胜．激光弯曲成形设备及其闭环成形过程．应用激光，2001，(5)

157 陈敦军，吴诗惇，李淼泉．板料成形的机制及其应用．兵器材料科学与工程，2000，(6)：58～62

158 周龙早，刘顺洪，林武，王令红．激光诱发热应力成形试验研究．电加工与模具，2000，(6)：20～25

159 刘顺洪，周龙早，万鹏腾．激光诱发热应力成形的研究．激光技术．2001，(4)：259～264

160 方刚．激光成形技术的特点及其应用．应用激光，2001，(2)：107～111

161 刘顺洪，周龙早，李志远．激光诱发热应力成形技术．电加工与模具，2000，(4)：37～41

162 李俐群，王威，林尚扬．温度剃度机理下激光参数对激光成形的影响．热加工工艺．2003 (3)：35．1～39

163 J. Lawrence, M. J. J. Schmidt , L. Li. The forming of mild steel plates with a 5. 1－5 kW high power diode laser. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, Vol. 41: 967～977.

164 Wenchuan Li, Y. Lawrence Yao. Laser forming with constant line energy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technolgy, 2001, Vol. 17: 196～203

165 Masse J. E, Barreau G. Laser generation of stress waves in metal. Surface and Coatings technology, 1995. 70: 231～234

166 Gerland M, Hallouin. M. Comparsion of two new surface treatment process－laser indueed shock waves and primary explosive. Application of fatigue behaviour. Material Science and Engineering, 1995. 1－A156: 175～185. 1

167 John A. Vaccari. Laser shocking extends fatigue life. American Machanist, July 1992: 65. 1～64

168 Kovaliuk B P, Nikiforov Yu N, Yanuskevich V A. Laser Shock Wave Induced Duffusion Processes in P－N Junction Structures. Fiaika I khimiya－Obraotki Materialov, 1993, 4: 14～17

169 G. Banas et al. laser shock induced mechanical and microstructural modification of welded marging steel. J. Appl. Phys, 1990, 67 (5): 2389～2401

170 Dubrujeaud B, Vardavoulias. M.Jeandia M, Dry sliding wear behavior of a P/M ferrous alloy superficially densified by laser shock proeessing. Surface and coatings technology, 1994, 67: 125～135. 1

171 张容康译．用激光冲击进行表面处理．国外激光，1993．5：3～5

172 Jeffrey. L. Dulaney, A. H. Clauer. laser peening process and apparatus with uniform pressure pulse confinement. Patent No. US6049058, 2000, 4

173 William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening, International Journal of Fatigue 21 (1999) 719～724

174 Y. Nikiforov, V. Yakovyna, N. Berchenko. Laser shock waves as a tool of changing the strains in materials, Materials Science and Engineering, A288 (2000) 173～176

175 Allan H. Clauer. David F. Lahrman. Laser shock processing as a Surface Enhancement process. Key Engineering Materials, 197 (2001), 121～144

176 郭大浩，张永康等．激光冲击强化机理研究．中国科学（E辑），1999，29 (3)：222～226

177 张永康，张淑仪，吴鸿兴等．抗疲劳断裂的激光冲击强化技术．中国科学（E辑），1997，22 (1)：28～34

178 Zhang Yongkang, Zhang Shuyi. Study of visual inspection and control methods of effectiveness of laser shock－processing. *Applied Physics*, 1997, A65: 419～423

179 Zhang Yongkang, Zhang Shuyi, Cai Lan, et al. Investigation of surface qualities of laser shock－processes zones and the effect on the fatigue life of aluminum alloy. *Surface and Coating Technology* 1997, 92: 105. 1～109

180 张永康．激光冲击强化效果的直观判别与控制方法研究．中国激光，1997，A24 (5)：467～471

181 蔡兰，张永康．激光冲击抗金属疲劳断裂的激光冲击参数优化试验研究．中国激光，1996，A23 (12)：117～120

182 Zhang Yongkang, Cai Lan. Effects of laser－induced shock waves on metals. *Progress in Natural Science*, 1996, 6Suppl.: 428～431

183 Zhang Yongkang, Cai Lan, et al. Measurements of laser－induced shock pressures using PVDF transducer. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, B6 (1): 81～85

184 Y. K. Zhang, C. L. Hu, L. Cai, J. C. Yang, X. R. Zhang. Mechanism of improvement on fatigue life of metal by laser－excited shock waves. *Applied Physics A*, 2001, 72: 113～116

185 於自岚，杨继昌，张永康．激光冲击强化效果的控制及人工神经网络预报研究．机械工程学报，2000，(12)：98～103

186 周建忠，杨继昌，张永康．激光冲击对球铁表面性能的影响．应用激光，2001，(2)：91～95

187 邹鸿承，戴蜀娟等．激光冲击处理提高铝合金性能研究．中国激光，1995．A22 (6)：476～480

188 周南，乔登江．脉冲束辐照材料动力学．北京：国防工业出版社，2005

189 Gerland M., Hallouin M. Comparison of Two New Surface Treatment Process—Laser induced Shock Waves and Primary Explosive: Application of Fatigue Behavior . Material Science and Engineering, 1992, A166: 176～185. 1

190 Masse J E, Barreau G. Laser Generation of Stress Waves in Metal. Surface and Coatings Technology, 1995, 70: 231～234

191 Holmes B S, Ehich D C. Surface Pressures form Laser—Supported Detonations. J. Appl. Phys., 1977, 48 (6): 2396～2403

192 王礼立，余同希，李永池．冲击动力学进展．合肥：中国科学技术大学出版社，1992

193 孙承伟．激光辐照效应．北京：国防工业出版社．2005

194 张永康．激光冲击处理提高航空铝合金疲劳寿命研究．南京航空航天大学博士学位论文，1995

195 K. Eisner, A. Lang, K. Schutte and H. W. Bergman. Shock hardening as a novel technique for materials processing. SPIE2789, 1996: 275. 1～280

196 R. Fabbro, J. Fournier et al. Physical study of laser－produced plasma in confined geometry, Journal of Applied Physics, 68 (2), 15 July, 775～784, 1990

197 张万甲等．强激光使铝靶层裂的模拟实验研究．高压物理学报，1994；8 (3)：205

198 李志勇. 强激光在材料中驱动的冲击波研究. 中国科学技术大学硕士学位论文, 1996

199 陆建等. 激光与材料相互作用物理学. 北京: 机械工业出版社, 1996

200 Calin Oros. Investigations involving shock waves generation and shock pressure measurement in direct ablation regime and confined ablation regime. Shock Waves (2002) 11: 393 - 397

201 李志勇, 朱文辉, 郭大浩等. 实验研究脉冲强激光在铝靶中诱导的冲击波. 中国激光, 1997, 124 (3): 259 ~ 262

202 朱文辉, 李志勇, 周光泉. 约束表面黑漆涂层对激光冲击波的影响. 强激光与粒子束. 1997, 9 (3): 458 ~ 461

203 刘世伟, 郭大浩, 王声波, 段志勇, 吴鸿兴, 戴宇生, 夏小平. 实验参数对激光冲击强化效果的影响. 中国激光, 2000 (10): 937 ~ 910

204 戴希敏, 任乃飞, 张永康, 蔡兰. 激光冲击提高45钢疲劳寿命的研究. 应用激光, 1998, 18 (6): 268 ~ 269

205 任乃飞, 张永康, 杨继昌, 蔡兰. 激光冲击对金属材料机械性能的影响. 激光技术, 1998, 22 (4): 235 ~ 238

206 任乃飞, 张永康. 金属材料的激光冲击表面处理. 应用激光, 1997, 17 (5): 201 ~ 205

207 任乃飞, 张永康. 激光冲击强化金属材料时的热传导. 应用激光, 1997, 17 (3): 105.1 ~ 108

208 Zhang Yongkang, Yu Chengye. Investigations on laser shock - processing to improve fatigue life of small hole in aircraft structures. *Chinese Journal of Aeronautics*, 1997, 10 (1): 41 ~ 45

209 周建忠, 杨继昌, 吴鸿兴等. 约束层特性对激光诱导冲击波影响的研究. 中国激光. 2002, 29 (11): 1041 ~ 1044

210 张永康, 周建忠等. 激光冲击成形新概念. 2001年中国机械工程学会论文集/特种加工技术, 395.1 ~ 395, 2001

211 周建忠, 张莹. 金属板料的激光冲压成形技术及其应用. 金属成形工艺, 2002, 20 (1): 26 ~ 28

212 周建忠, 张永康, 杨继昌. 激光冲击成形技术的研究. 激光技术, 2002, 26 (6): 178 ~ 181

213 张莹, 周建忠. 金属板料的几种无模成形技术的研究现状. 中国制造业信息化, 2003, 32 (2): 79 ~ 81.

214 周建忠, 张永康, 杨继昌. 基于激光冲击波技术的板料塑性成形新技术. 中国机械工程, 2002, 13 (22): 1938 ~ 1940

215 Hackel, Lioyd, Harris, Fritz. Contour Forming of Metals By Laser Peening. Patent No. US6410884, 2005. 1 - 06 - 25

216 杨继昌, 周建忠, 张永康. 激光冲压金属板料成形的研究. 江苏大学学报, 2002, 23 (1): 1 ~ 4

217 周建忠, 张永康, 杨继昌. 金属板料的激光冲击成形实验研究. 应用激光, 22 (2): 165.1 ~ 168

218 J. Z. Zhou, J. C. Yang, Y. K. Zhang, M. Zhou. A Study on Super Speed Forming of Sheet Metal by Laser Shock Waves. Journal of material processing technology. (2002). 129/1 - 3: 243 ~ 246

219 周建忠, 杨继昌, 张永康. 柔性化的激光冲压成形新技术研究. 2002年中国机械工程学会论文, 2005. 1 - 12

220 张永康, 周建忠, 杨继昌等. 激光冲压精密成型装置. 实用新型专利 ZL 01 2 63316. X, 2005. 1 - 6. 26

221 张永康, 周明, 周建忠, 杨继昌等. 一种激光冲击精密成形方法和装置. 专利申请号: 01134063. 0, 2001. 10. 19

222 周建忠, 杨继昌, 张永康等. 一种基于激光冲击波技术的快速制造模具的方法和装置. 专利申请号: 02138336. 7, 2005. 1 - 9. 25

223 张永康, 周建忠, 杨继昌等. 一种基于激光冲击波技术的快速制模装置. 专利申请号: 02264630. 2, 2005. 1 - 9. 25

224 周建忠, 杨继昌, 张永康. 一种用于激光冲击处理的柔性贴膜, 专利申请号: 02138338. 3, 2005. 1 - 9. 25

225 叶云霞. 激光淬火和激光珩磨技术处理发动机气缸内壁的理论和试验研究. 江苏大学硕士论文, 1999

226 沈利群. 铸铁的激光热处理现状. 金属热处理, 1993, (5): 3 ~ 6

227 李泉华. 激光热处理在汽车零件生产中的应用. 激光集锦, 1997, (5): 16 ~ 24

228 李炳华. 激光表面改性技术在发动机零件上的应用. 金属热处理, 1994, (5). 3 ~ 8

229 吴钢. 激光淬火温度场模拟及激光参数的优化选择. 上海海运学院硕士学位论文, 1999

230 吴旭峰. 激光热处理的工艺模型与实验研究. 华侨大学硕士论文, 1998

231 赵新等. 宽带激光处理铸铁组织与强韧性的研究. 天津大学学报, 1991, (6). 754 ~ 757

232 R. C. Reed, et al. Laser transformation hardening of steel: effects of beam mode, beam size and composition. Materials science and technology, 1991, (15): 109 ~ 118

233 R. K. Shiue and C. Chen. Laser transformation hardening of tempered 4340 stell. Metallurgical transformations A, 1992 (A). 263 ~ 270

234 M. Labudovic, et al. Three - dimensional finite element modelling of laser surface modification. Proc Instn Mech Engrs. 2000 (B): 683 ~ 692

235 李俊昌等. 激光热处理温度场及相变硬化带的快速计算. 中国激光, 1997, (7): 665 ~ 672

236 沈莲等. 灰铸铁激光表面处理的显微组织与耐磨性的研究. 金属热处理学报, 1990, (1): 20 ~ 30

237 戴忠森, 吴钢, 石娟. 激光淬火硬化层的硬度分布与冷却速度. 上海海运学院学报, 1998, (3): 34 ~ 38.

238 徐佐仁, 许国桢. 激光加热时的温度场与相变过程研究. 上海交通大学学报, 1991, (2): 57 ~ 64

239 林子光, 王恩鸿. YAG激光热处理. 金属热处理, 1998, (10): 3 ~ 4

240 李俊昌. 激光热处理优化控制研究. 北京: 冶金工业出版社, 1995

241 林子光. 激光微精处理的应用. 天津纺织工学院学报, 1999, (2): 7 ~ 11.

242 材料耐磨抗磨腐蚀及其表面技术丛书编委会. 激光表面强化. 北京: 机械工业出版社, 1992

243 关怀. 应用激光表面强化技术维修缸孔. 汽车工艺与材料, 1997, (6). 40 ~ 41

244 林子光, 发动机气缸经YAG激光网纹状淬火的效果. 摩擦学进展, 1998, 3 (3/4): 71 ~ 74

245 叶云霞, 符永宏等. 快速轴流 CO_2 激光器激光相变硬化处理HT250的理论和试验研究. 中国激光, 2002, (10): 945 ~ 949

246 Yunxia YE, Yonghong FU et. al. Study on laser transformation hardening of HT250 by high speed axis flow CO_2 Laser. Journal of materials science and engineering, 2003, 19: 170 ~ 173



第 6 篇

快速原型与快速制造

主 编 颜永年

编 写 颜永年 林 峰 冯 涛 单忠德 吴任东
齐海波 张人佶 熊 卓 张 磊 唐果林
卢清萍 杨伟东 张定军 王青岗 薛 明
陈立峰 刘海霞 赵保军 刘 筠 J.Keverian

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会





第1章　快速原型概述

快速成形即快速制造，是指由CAD模型直接驱动的快速制造任意复杂形状三维实体的技术总称。快速原型（RP——rapid prototyping）是快速成形（即快速制造）大家族中最早出现并发展的一种技术。快速原型技术所完成的产品基本上不具有使用功能而仅作为产品设计的评价使用，但随着快速成形技术的发展，快速原型技术在工艺、设备和材料方面取得了极大的进步，特别是成形件的力学性能和精度的提高，使成形件逐渐具有非评价使用功能（设计思想评价和装配检验功能以外的功能）：如承受很大的载荷应力、热应力、冲击应力和交变应力等；足够的硬度和耐磨性；化学稳定性、热稳定性和湿度稳定性；特殊的电、磁性性能；特殊的生物学性能以及良好的表面质量（有的快速成形工艺所完成的原型表面质量已完全可以和数控加工的表面质量媲美）和形位精度，使快速原型技术的应用大大扩大。快速工具（rapid tooling）、快速模具（rapid mold）、快速生物模型（rapid bio-model）等等的出现又进一步扩大了RP的应用范围，提高了其学术价值。此外，内嵌微传感器零件制造、电子元器件封装制造及MEMS（微机械制造系统）和组织工程支架成形等等先进制造技术都在不同层面上涉及快速原型制造，不但与离散-堆积成形原理有关，而且或是需要RP功能强大的成熟的数据处理系统，或是需要采用RP技术在材料梯度构造方面的优势。进入21世纪以来，快速原型技术向快速制造具有使用功能零件方向发展的趋势已更为明显。快速原型一词已不能涵盖该技术领域的内容。

在快速原型技术如此快速发展的背景下，许多学者试图用更为宽泛的学术概念和更为明确的工程内容来命名这一领域，如德国快速成形学者和著名企业家Dr. Hans Langer建议将所有与快速成形有关的制造统称为电子数据制造，即e-manufacturing，其理由为：所有最终使用零件（end-use parts）直接制造的快速性、柔性和低成本特性均来自于产品的电子数据（electronic data）；芬兰快速成形学者Dr. Jukka Tuomi则建议将一切基于离散-堆积成形原理的成形方法统称为快速制造，再根据各种方法的特点冠以不同的名称，即：

快速制造（rapid manufacturing——RM）即快速成形或快速成形制造：
- 快速原形制造（RPM——rapid prototyping manufacturing）
- 快速工具制造（RTM——rapid tooling manufacturing）
- 快速模具制造（RMM——rapid mold manufacturing）
- 快速生物模型制造（RBM——rapid bio-model manufacturing）
- 快速支架制造（RSM——rapid scaffold manufacturing）
- ⋮

许多学者比较赞成Dr. Tuomi的观点，笔者也认为用快速制造（RM）作为该领域的科学技术的统称比较恰当。电子数据制造（e-manufacturing）虽然抓住了数字制造这一特点，但没有突出源于离散-堆积成形原理的“快速”（rapid）的特质。事实上，数控加工技术也是典型的电子数据制造技术，但它是基于去除成形原理的加工技术，与基于离散-堆积成形原理的快速制造是根本不同的。快速制造（快速成形）是快速原型制造向功能性零件制造方向发展的结果，是一类先进的制造技术的总称，其内核和本质与快速原型技术是相同的，由此可得出快速制造的定义：即由产品三维CAD模型数据直接驱动，组装（堆积）材料单元而完成任意复杂且具有使用功能的零件的科学技术总称；与其相对应，快速原型制造的定义为：由产品三维CAD模型数据直接驱动，组装（堆积）材料单元而完成任意复杂三维实体（不具使用功能）的科学技术总称。其基本过程是首先完成被加工件的计算机三维模型（数字模型、CAD模型），然后根据工艺要求，按照一定的规律将该模型离散为一系列有序的单元，通常在Z向将其按一定厚度进行离散（分层、切片），把原CAD三维模型变成一系列的层片的有序叠加；再根据每个层片的轮廓信息，输入加工参数，自动生成数控代码；最后由成形机完成一系列层片制造并实时自动将它们联接起来，得到一个三维物理实体。这样就将一个复杂的三维加工转变成一系列二维层片的加工，因此大大降低了加工难度，这就是所谓的降维制造。由于成形过程为材料标准单元体的叠加，成形过程无需专用刀具和夹具，因而成形过程的难度与待成形物理实体形状的复杂程度无关，见图6.1-1和图6.1-2。

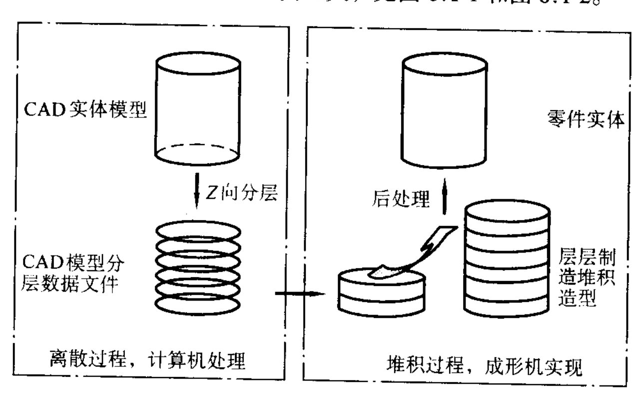


图6.1-1　快速成形技术的原理图

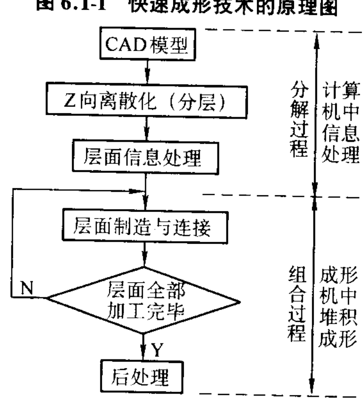


图6.1-2　快速成形的基本过程

尽管RP-rapid prototyping的英文原义是指快速原型，常简写为“RP”，已成为学术界和工业界的专用术语，但它并不仅仅指快速原型，而是代表了一种成形概念，泛指快速成形过程，快速成形工艺方法以及相应的软件、材料、设备以及整个技术链，即RP已被公认为是泛指快速成形或快速成形制造。由于快速制造已用RM（rapid manufacturing）代表，故RP不具有快速制造之意。本书中，‘成形’之‘形’不用‘型’而用‘形’，其意非指模型、型腔等而是指有形之物体，即形也，物也，成形寓意为形成三维实体。在快速成形技术的发展过程中，各个研究机构和人员均按照自己的理解，从不同的侧面强调其特点而赋予其不同的称谓，如自由

成形制造 FFF（free form fabrication）、实体自由成形制造 SFF（solid freeform fabrication）、分层制造 LM（layered manufacturing）、添加制造 AM（additive manufacturing）或材料增长制造 MIM（material increase manufacturing）、直接 CAD 制造 DCM（direct CAD manufacturing）、即时制造 IM（instant manufacturing）等等。快速成形技术的不同称谓即反映了其各个侧面的重要特征。在工程上，经常混淆 RP、RPM 原型与 RM 原型。事实上，它们在学术上是有明确的含义的。如果原型仅用来对设计进行评价，即原型仅具备对设计评价的功能，此类原型应称为 RP 或 RPM 原型；当原型具备了非评价功能，如用来翻制模具或金属零件或陶瓷型等，此类原型就应称为 RM 原型了。

快速成形技术所采用的分层制造的思想，实际上在工程中早已大量应用，如房屋、大坝等各种建筑都是从底层一层层堆砌而成，这就是分层制造。但它成为一项成形技术、一种自动化的成形过程，则是计算机技术、数控技术、激光技术、材料和机械科学等发展和集成的结果，带有鲜明的时代特征。在成形概念上它以离散－堆积成形为指导思想；在控制上以数控（numerical control 或 digital control）为基础；以制造的最大柔性和成形件的最大复杂度为目标。显然，快速成形只有在计算机技术、数控技术和 CAD 技术高度发展的今天，才有可能产生实现。CAD 技术实现了零件的曲面和实体造型，功能强大的数据处理软件能够完成复杂而精确的离散运算和繁杂的数据转换；先进的数控技术为高速精确的联动控制提供了必要的运动学和动力学基础，作为快速成形的使能技术，激光技术和微滴/流喷/挤技术保证形成和组装材料微滴/流，这是精确高效离散和组装（堆积）材料的前提。纵观快速成形发展史，可以清楚地看出快速成形技术的发展与材料科学是密不可分的，材料科学与工程的许多成果和进步都将给快速成形技术带来新的发展机遇。

上述定义的核心和基本点就在于成形过程的数字直接驱动和材料的受控组装（堆积），这些特征奠定了快速成形在现代制造科学和技术中的重要地位。快速成形制造的快速性是建立在其组装性基础上的柔性，因此可以说组装性是快速成形制造快速性的基础。无需专用工装、专用工具，仅改变被成形零件的 CAD 模型，就可获得新的成形件，从而获得零件制造全程意义上的快速性。快速成形的“快速”（rapid）一词、RP 技术之得名均源于此。

快速成形技术是上世纪 80 年代中期发展起来的先进制造技术，其产生的时代背景是现代工业生产正在从大规模批量化生产转变为小批量和个性化生产，产品的生命周期和投放市场的时间越来越短。比如在汽车行业，十年前开发一种新车型需要 2～3 年左右的时间，而现在汽车制造厂商每半年甚至更少时间就有一种新车型问世，而一种车型的产量已从过去的上百万辆下降到现在的几万辆甚至几千辆。家电行业产品的更新换代就更快了。市场的竞争要求尽可能缩短产品的设计和制造周期，以减少投资风险。

快速成形技术能快速地将产品零件的计算机辅助设计模型（CAD 模型）转换为物理模型、零件原型和零件，而无需采用专用工具和工装，这一宝贵技术特征使快速成形技术能适应当代制造业市场的竞争环境而飞速地发展起来。上世纪 80 年代和整个 90 年代是快速成形工艺、设备和材料蓬勃发展的年代，80 年代中期美国在世界上推出了第一台商品化的快速成形设备，并很快扩展到日本及欧洲。我国是世界上比较早进入这一技术领域的国家，于 20 世纪 90 年代初相继进行了研究与开发。当前国际上快速成形工艺已达数十种，较大规模的专业厂家近 20 家，遍布全球的快速成形研究机构和服务单位数百家。2003 年全球的快速成形设备年安装数为 1864 台，中国大陆 2003 年安装了 183 台快速成形设备，占世界同年安装总量的 9.8%，超过欧洲任何一个国家，为世界上仅次于美、日的第三大快速成形设备年安装量的国家。2003 年全球快速成形设备累计安装总量达 11 376 台套，其设备和服务的产值达 5.289 亿美元。快速成形技术发展的速度，总体来说已超过 20 世纪 50 年代末、60 年代初发展起来的数控技术的发展速度。

根据对 RP 的定义，快速成形技术具有以下几个基本特点。

1）由 CAD 模型直接驱动。快速成形技术实现了设计与制造一体化，在快速成形工艺中，计算机中的 CAD 模型数据通过接口软件转化为可以直接驱动快速成形设备的数控指令，快速成形设备根据数控指令完成原型或零件的加工。由于快速成形以分层制造为基础，可以较方便地进行路径规划，将 CAD 和 CAM 结合在一起，实现设计制造一体化，这也是直接驱动的含义。

2）可以制造具有任意复杂形状的三维实体。快速成形技术由于采用分层制造工艺，将复杂的三维实体离散成一系列层片加工和加工层片之叠加，从而大大简化了加工过程。它可以加工复杂的中空结构，不存在三维加工中刀具干涉的问题，因此理论上讲可以制造具有任意复杂形状的原型和零件。

3）快速成形设备是无需专用夹具或工具的通用机器。快速成形技术在成形过程中无需专用的夹具或工具，成形过程具有极高的柔性，这是快速成形技术非常重要的一个技术特征。对于不同的零件，不需要制造传统工艺中所需要的专用工装、模具或工具，而只需要建立 CAD 模型，调整和设置工艺参数，即可制造出符合要求的零件。快速成形设备是一种典型的通用加工设备。

4）成形过程中无需人工干预或较少干预。快速成形是一种完全自动的成形过程，传统成形设备在成形过程开始时需要由操作者安装和调整毛坯。而对于快速成形工艺，则是材料在底板上逐渐堆积成形，不存在安装和调整的过程。整个成形过程中，操作者无需或较少干预；出现故障，设备会自动停止，发出警示并保留当前数据；完成成形过程时，机器会自动停止并显示相关结果。

5）快速成形使用的材料具有多样性。快速成形技术具有极为广泛的材料可选性，其选材从高分子到金属材料、从有机到无机、从无生命到有生命（细胞），这为快速成形技术广泛应用提供了前提，可以在航空、机械、家电、建筑、医疗、医学和生物等各个领域应用。此外，快速成形技术是边堆积边成形的，因此它有可能在成形的过程中改变成形材料的组分，从而制造出具有材料梯度的零件，这是其他传统工艺难以做到的，也是快速成形技术与传统工艺相比主要优势之一。快速成形过程将材料制备与材料成形紧密地结合起来。

1　快速成形技术的发展历程

快速成形技术的概念大约出现在 20 世纪 70 年代末，而实际上采用分层制造原理堆积三维实体的思维雏形，最早可追溯到 19 世纪。早在 1892 年，美国的 J. E. Blanther 在他申请的专利中就提出采用分层制造法构成地形图。1902 年，Carlo Bease 在其申请的专利中提到采用光敏聚合物制造塑料件的原理，这是光固化快速成形技术的初始设想。而 Paul L Dimatteo 在其 1976 年的美国专利中明确提出，先用轮廓跟踪器将三维物体转化为二维轮廓薄片，然后用激光切割使这些薄片成型，再用螺钉、销钉将一系列薄片连接成三维物体。这些设想和现代的叠层实体制造技术 LOM（laminated object manufacturing,）的原理极为相似。1979 年，日本的 Nakagawa 教授开始采用分层制造技术制作实际的模具。上述的专利虽

然提出了快速成形技术的基本原理，但是还很不完善。20世纪70年代末到80年代初，美国的Alan J. Hebert、日本的小玉秀、美国UVP公司Chareles W. Hull等人相继独立的提出了快速原型（RP—rapid prototyping）概念。20世纪80年代，激光技术得到了高速的发展，高质量的激光束为材料快速固化提供了先决条件，第一个快速成形工艺就是利用当时先进的激光技术来实现光固化树脂的逐点、逐层胶连固化而成形。Chareles W. Hull在美国UVP公司的支持下，完成了一个自动三维成形装置Sterolithography Apparatus（SLA-1），1986年该系统获得了专利，这成为快速成形技术发展的一个里程碑。美国3D Systems公司为激光固化快速成形系统最大的生产和研究厂家。

激光选区烧结工艺SLS（selective laser sintering）由美国德克萨斯州大学奥斯汀分校的Carl R. Deckard于1986年提出，采用激光束烧结粉末而成形，并获得了专利，1988年研制成功了第一台SLS成形机，后由美国B. F. Goodrich公司投资的DTM公司将其商业化，推出SLS Model 125成形机，随后推出了Sintersation系列成形机。在随后的近二十年的时间里，各国的研究学者在SLS技术的成形工艺、方法、材料、成形效率、精度控制及其应用方面进行了大量的理论、实验研究和商业化开发工作。

叠层实体制造工艺LOM（laminated object manufacturing）是快速原型技术中早期发展的技术之一。该工艺由美国的Michael Feygin首先提出，即用激光束切割簿材（如纸材）而层层粘接成形，于1985年获得了专利，并由Helisys，Inc公司于1991年推出LOM 1015、LOM 2030两种型号的成形机。

直接将材料（如塑料、蜡等）熔化并挤压喷出堆积成形，称为熔融沉积成形工艺FDM（fused deposition modeling），是众多快速成形工艺中发展速度最快的工艺之一。1992年美国的S. Scott Crump获得了FDM工艺第一个专利。

美国麻省理工学院（MIT）的E. M. Sachs博士提出用喷射黏结剂微滴去粘连铺平粉层中的粉末，实现局部的固结，逐层制造而获得三维实体模型的三维打印工艺3DP（three dimension printing），E. M. Sachs于1993年获得了专利。Z Corp和Soligen等许多公司随后购买了3DP的专利权。表6.1-1为上述五种专利情况简表。

表 6.1-1 主要 RP 工艺获得专利的情况表

年份	国别	工艺名称	专利所有人
1985	美国	叠层实体制造 LOM	M. Feygin
1986	美国	光固化工艺 SL	C. W. Hull
1986	美国	激光选区烧结 SLS	C. R. Deckard
1993	美国	三维印刷 3DP	E. M. Sachs
1992	美国	熔融沉积制造 FDM	S. S. Crump

自1986年第一台快速成形设备SLA-1出现至今，近20年来，世界上已有大约二十多种不同的成形方法和工艺，而且新方法和工艺不断地出现。目前已出现的RP技术的主要工艺有：

1）SL（Stereolithography）工艺，称为光固化或立体光刻，是最早出现的一种RP工艺，它采用激光逐点照射光固化液态树脂使之固化的方法成形，是当前应用最广泛的一种精度较高的成形工艺。

2）LOM或称SSM（slicing solid manufacturing），称为分层实体制造工艺，它采用激光切割箔材，箔材之间靠热熔胶在热压辊的压力和热的作用下熔化并实现粘接，逐层叠加制造原型。

3）SLS工艺，称为激光选区烧结，它采用激光逐点烧结粉末材料，使包覆粉末材料的固体黏结剂或粉末材料本身熔融粘连实现材料的成形。

4）FDM或称MEM（melted extrusion modeling）工艺，称为熔融沉积成形或熔融挤压成形，它采用丝状或颗粒状热塑性成形材料，连续地送入喷头后，在其中加热熔融并挤出喷嘴，逐步堆积成形。

5）3DP工艺，称为三维印刷或三维打印，它采用逐点喷射黏结剂来黏结粉末材料的方法制造原型，该工艺可以制造彩色模型，在概念型应用方面很有竞争力。

6）PCM（patternless casting manufacturing）工艺，称为无木模铸造，它采用逐点喷射黏结剂和催化剂即两次同路径扫描的方法来实现铸造用树脂砂粒间的粘接并完成砂型自动制造。该工艺由清华大学等研发成功。

7）BPM（ballistic particle manufacturing）工艺，称为弹道粒子制造。它用一个压电喷射（头）系统来喷射并沉积熔化了的热塑性塑料的微小颗粒单元。BPM的喷头安装在一个5轴的运动机构上，对于零件中悬出部分，由于改变喷射方向而无需加支撑。由于该系统价格昂贵，无竞争力，当前已在RP市场上消失。

8）3D Plotting（three dimentional plotting），称为三维绘图工艺，它采用泵将一定温度的熔融状材料通过极精密的喷嘴（直径为0.05 mm）喷出而堆积成形。该工艺由美国Solid-scape公司（原Sanders Prototyping公司）商品化并推向市场。

9）MJS（Multiple Jet Solidification）工艺，称为多路喷射固化，该工艺采用活塞挤压熔融材料使其连续地挤出喷嘴的方法来堆积成形。由德国Institute for Manufacturing Engineering and Automation（IPA）和Institute for Applied Materials Research（IFAM）共同开发。

10）SGC（solid ground curing）工艺，称为实体磨削固化，它采用掩膜版技术使一层光固化树脂层面，整体一次成形，而不是SL设备那样，每一层面（树脂）是逐点照射固化成形的，这样就提高了原型制造速度。该工艺由以色列的Cubital公司开发成功并推出商品机器。

11）3D Printer工艺，称为三维打印机，它采用块状固体热塑性成形材料，输入喷嘴后在其中加热并熔化，挤出喷嘴逐点堆积成形。美国Stratasys与IBM合作开发成功的Genisys 3D Printer作为桌面化的设备而推向市场。

12）CC（contour craft）工艺，称为轮廓成形工艺，它采用堆积轮廓和浇铸熔融材料相结合的方法来成形，在堆积轮廓时采用了简单的刮刀、刮板式装置，形成原型的层片为准三维。美国南加州大学（University of Southern California）研究成功。

13）RIPF（rapid ice prototype forming），称为低温冰型快速成形工艺，采用脉宽调制喷头高频喷射离散水滴，在低温下堆积冰原型。清华大学与美国Missouri-Rolla大学联合研发成功。

14）SIS（selective inhibition sintering）选择性抑制烧结，由美国南加州大学提出并进行研究。该工艺用喷墨喷头选择性地喷射抑制剂，然后用热辐射加热器对该层进行辐射加热，使未被抑制剂覆盖部分很快互相粘接而成形。

上述RP工艺可以按所用原材料形态、堆积单元的几何形态和是否需要添加（设计）支撑进行分类。

1.1 按所用材料形态分类

按所用原材料形态分类，见图6.1-3。

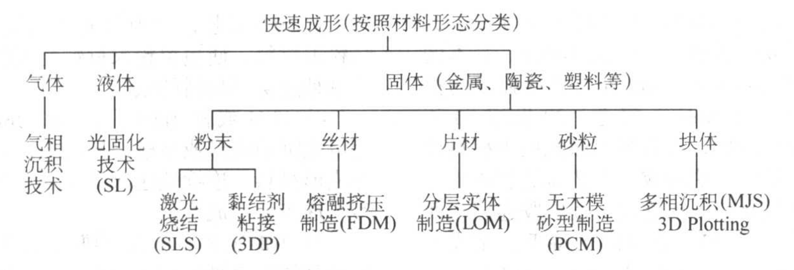


图 6.1-3 基于材料形态的 RP 工艺分类

1.2 按堆积单元的几何形态分类

从点单元到体的堆积成形，如 3DP、BPM、SL、SLS、RIPF、3D Plotting、PCM；

从线单元到体的堆积成形，如 FDM、MIS、CC；

从面单元到体的堆积成形，如 LOM、SGC；

1.3 按是否需另外设计支撑结构分类

无需单独设计支撑的成形方法，如 SLS、3D Printing、LOM、SGC、BPM 等；

需另外设计支撑结构的成形方法，如 FDM、SL 等。

1.4 按材料状态变化及其连接机理分类

基于化学变化的 RP 是指依靠成形材料单元产生化学变化而实现材料间连接的一类 RP 工艺，常见的有 SL、SGC 等。这类 RP 工艺都是采用光固化材料，由激光引发成形材料发生交联化学变化，如图 6.1-4 所示。

基于物理作用的 RP 工艺是指在成形过程中，材料单元性质不发生变化而实现连接。它又可分为黏结剂粘接法和材料熔融粘接法。黏结剂粘接法 RP 工艺即成形过程中材料之间的连接靠黏结剂实现，这类工艺有 LOM、间接 SLS、3DP 等。而材料熔融粘接法 RP 是指成形过程中材料之间的粘接是靠材料本身熔融扩散来实现的，这类工艺通常称为熔融堆积 RP 工艺，常见有 FDM、BPM、3D Plotting、MJS、CC 等。

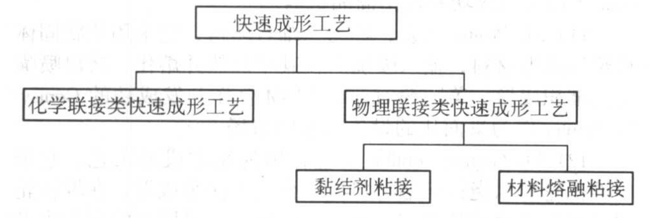


图 6.1-4 RP 工艺分类图

2 快速成形技术在新产品开发中的应用

快速成形技术在航空航天、汽车、机械、电子、电器、医学、玩具、建筑、艺术品等许多领域获得了广泛应用，取得了显着的成果，主要在如下几方面。

1）外形设计　很多产品特别是家电、汽车等对外形的美观和新颖性要求极高。一般检验外形的方法是将产品图形显示于计算机终端，但经常发生“画出来好看而做出来不好看”的现象，且由于“可看不可摸”，很不直观。采用 RP 技术可以很快做出原型，供设计人员和用户从各种标准和角度进行审查，使得外形设计及检验更直观、有效和快捷。

2）检查设计质量　以模具制造为例，传统的方法是根据几何造型在数控机床上开模，这对于一个价值数十万乃至数百万元的复杂模具来说风险太大，设计上任何不慎，反映到模具上就是不可挽回的损失。RP 方法可在开模前真实而准确地制造出零件原型，设计上的各种细微问题和错误就能在模型上一目了然地显示出来，这就大大减少了开模风险。通过快速制造出物理模型，可以尽早地对设计进行评估，缩短设计反馈的周期，提高了产品开发的成功率，降低开发成本，总体的开发时间也缩短。

3）功能检测　设计者可以利用原型快速进行功能测试以判明是否最好地满足设计要求，从而优化产品设计。凡是涉及到空气动力学或流体力学实验的各种流线型设计均需做风洞和流阻试验，如飞行器、船舶、风扇、叶轮、高速车辆等的设计，采用 RP 原型可精确地按照原设计将自由曲面模型迅速地制造出来并进行测试，与数字模拟相互配合，可获得最佳的流线型曲面、扇叶曲面和自由曲面等设计。

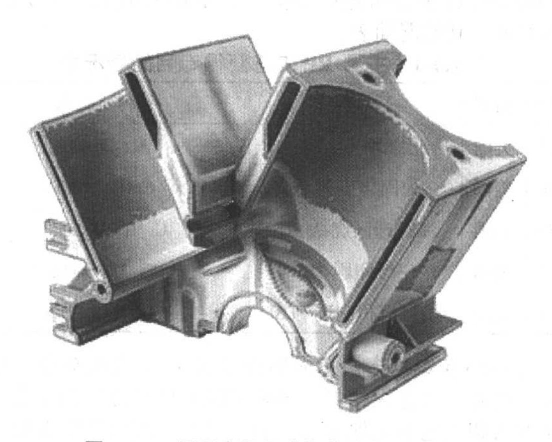
4）手感测试　通过原型，人们能触摸和感受实体，这对照相机、手握电动工具等的持握部分设计极为重要，快速成形技术在人机工程应用方面具有广泛的意义。

5）装配干涉检验　对有限空间内的复杂系统，进行装配干涉检验是极为重要的，如导弹、卫星以及各种发动机和武器系统等。原型可以用来做装配模拟，观察工件之间如何配合、可能的相互干涉。如汽车发动机上的排气管，由于安装关系比较复杂，通过原型装配测试可以一次成功地完成设计。

6）供货询价及用户评价等　由于能及时提供产品模型给用户评价，大大增加了产品的竞争力。

7）试验结果分析模型　RP 技术还可以应用在计算分析与试验模型上。例如，对有限元分析的结果可以做出实物模型，从而帮助了解分析对象的应力和变形分布情况。

图 6.1-5 为三维显示的有限元分析结果模型。


图 6.1-5 用于有限元分析的彩色 RP 模型

8）生理医学模型　各种外科手术，特别是复杂外科手术迫切需要真实比例的受损器官之原位物理实体模型。如车祸造成骨盆粉碎性破损，仅根据 CT 三锥重构成像是很难弄清腹腔内骨碎片相互的几何关系，给手术治疗带来很大的困难，大大增加了手术的风险和时间。如将 CT 数据输入 RP 设备，制成破损骨盆的原位三维实体模型，就非常有效地帮助外科医生决定手术方案，完成手术。此种器官模型也是医生、病人和家属三方沟通、讨论制定手术规划的最好媒介物体。其他器官 RP 模型与骨盆 RP 模型一样都具有重要意义。



3　快速成形应用情况

据 Terry Wohlers 报告（"Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing——State of the Industry，2004 Worldwide Progress Report"），RP 技术在各工业和学术研究中的应用已趋成熟化和规模化。其行业分布比例如图 6.1-6 所示。在各工业领域中汽车交通工具和消费类产品为主要应用领域，共占 48.3%；其次是政府及军事部门和航空航天工程占 17.1%；值得注意的是，在医学领域和高等学校研究机构中的应用也在逐年增加，分别达到了 9.8% 和 9.3%。

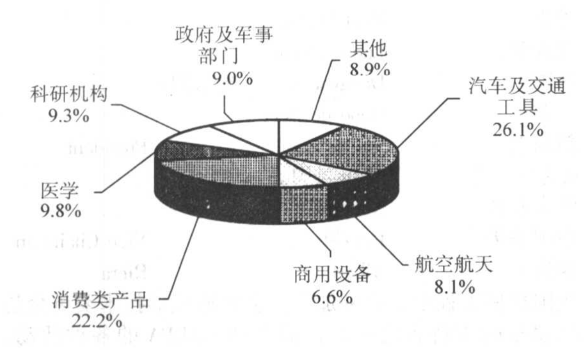


图 6.1-6　快速成形的应用领域

图 6.1-7 为快速成形技术应用的技术领域。其中，功能模型是主要应用领域占 33.9%（包括装配模型）；可视化模型（用于评价设计等）占 20.6%，为第二大应用；与工具制造有关的应用为第三大类，占 17.8%；铸造方面应用为 8.3%。从统计数据上可以看到，目前 RP 技术还主要应用在模型上，直接制造功能零件的比例还很少。这和当前 RP 技术的技术水平紧密相关的。

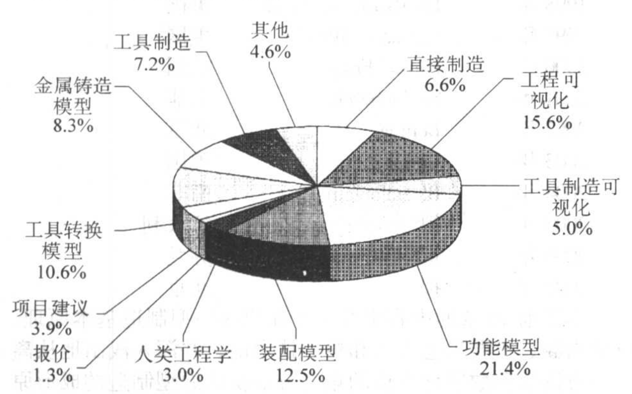


图 6.1-7　快速成形的各种应用比例

4　快速成形技术的发展趋势

随着 RP 技术的迅速发展，世界上研究 RP 技术的机构数目也越来越多。据统计，20 世纪 90 年代中期，世界上已有 230 多家机构开展 RP 技术的研究，目前在互联网上有数百家大学、研究机构和企业介绍了研究和开发 RP 技术的状况。在这一领域，美国一直处于领先地位，各种工艺大多在美国最先出现，研究、开发的工艺种类也最多。日本是 RP 应用强国，但研究领域过于集中，主要在光固化树脂成形方面。欧洲（特别是德国）许多研究机构和厂家开展多种 RP 工艺的研究和开发，水平很高。我国清华大学、北京隆源自动成型有限公司、华中科技大学、西安交通大学等研究单位和企业在 RP 领域也开展了广泛的研究。

近几年来，快速成形技术正在朝两个方向发展，如图 6.1-8 所示：

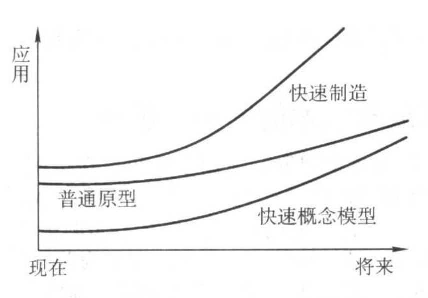
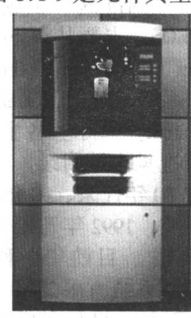


图 6.1-8　快速成形技术发展趋势

随着快速成形技术发展，一方面原型的精度、成形件的性能及成形速度不断提高；另一方面设备和材料价格不断下降，加上三维 CAD 系统的逐渐普及，其应用领域及市场越来越广，从这些年的发展来看，一般原型应用的比例逐渐减少，概念模型和功能零件将占据大部分快速成形的应用市场份额。

1）功能零件制造　直接制造功能零件一直是 RP 研究的热点和最具挑战性的方向，许多专业公司、高等学校和科研机构都在致力于这方面的研究，本书下篇将进行详尽的讨论。

2）概念模型制造　用于概念设计的原型称为概念模型，其对物理化学特性和成形精度要求不高，主要要求为成形速度快，适于设计、办公室场合（设备小巧，运行可靠、无污染、清洁、无噪声），操作简便。概念模型主要的应用包括造型设计、结构检查，装配干涉检验，静、动力学试验和人机工程等，范围广泛。概念模型占 RP 应用的一半以上，前景广阔。美国 Z Corp 公司的 Z310、Z402，Stratasys 的 Dimension，以色列 Objet 公司的 Quadra 以及我国北京殷华等公司的MEM－200型都是代表性的概念型 RP 设备。这类设备成形速度较快，成形空间一般在 200 毫米左右，尺寸精度适中。图 6.1-9 是几种典型的概念型快速成形系统。



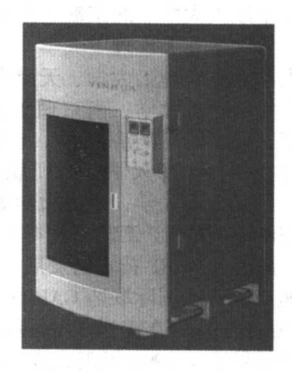
(a) Stratasys 的Dimension



(b) Z Corp 的Z310



(c) Objet 的Eden330



(d) 北京殷华的MEM－200

图 6.1-9　概念型快速成形系统

3）与生物技术相结合　快速成形技术与生物技术和生命科学相结合是快速成形制造在本世纪发展的主要趋势之



一，如在组织工程和细胞三维受控组装中的重要应用。详见第 18 章。

5 快速成形技术的国内外现状

国外 RP 技术的研究和应用主要集中在美国、欧洲和日本。美国开展 RP 技术研究的大学主要有：MIT，以 Prof. Emanuel Sachs 为首，他们研究、开发了 3DP 工艺；The University of Dayton，以 Prof. Allan J. Lightman 为首，从事多种 RP 工艺的研究，每年这所大学与美国制造工程协会（SME）联合召开国际 RPM 学术会议；The University of Texas at Austin，以 Prof. Joseph J. Beaman 为首，主要研究 SLS 工艺，国际 SFF 学术会议在此召开；Stanford University，以 Prof. Fritz B. Prinz 为首，主要研究 SDM（Shape Deposition Manufacturing）工艺及应用；Carnegie Mellon University，以 Lee E. Weiss 为首，主要研究 RP 在微机械中的应用。另外，美国还有多所大学和研究机构从事 RP 新工艺、新技术及直接制造陶瓷或金属原型等多方面的研究。

美国主要 RP 公司的研究开发情况：3D Systems Inc. 主要研究 SL 工艺、设备及应用；原 DTM Corp. 主要研究 SLS 工艺、设备及应用；Stratasys Inc. 主要研究 FDM 工艺、设备及应用；Z Corp. 研究并生产以 3DP 工艺为主的 RP 设备；Solidscape 将精密 RP 原型应用于手饰等，为世界最高水平，其工艺是热塑性非金属材料的喷射成型（Jetting）。

日本主要的研究单位有：东京大学，以中山威雄教授为首，从事 SL 工艺和 LOM 工艺及技术的研究；SONY 公司属下的 D－MEC 推出用于 SL 工艺的 SCS 型设备；Mitsubishi 公司属下的 CMET INC. 推出用于 SL 工艺的 SOUP 设备，在日本已占据相当市场；Mitisui 公司属下的 MES 推出用于 SL 工艺的 COLAMM 成形机；Du Pont/Teijin－Seiki 公司推出用于 SL 工艺的 SOMOS 设备。

西欧许多研究机构和厂商也将目光瞄准这一领域，如：德国 Electro－Optical System Gmbh 即 EOS，主要从事 SL 工艺和 SLS 工艺的研究与开发；瑞典 Sparx AB（Larson Brothers Co. AB）推出“Hot Plot Rapid Prototyping”系统，类似于 Helisys 的 LOM 工艺；法国 Laser 3D 推出 RP System。国际上各主要 RP 学术研究与商业化生产单位进一步情况见本篇附录。

我国 RP 方面的研究始于 20 世纪 80 年代末、90 年代初。清华大学于 1989 年即开始 RP 软件研究，1992 年开始开展较大规模 RP 工艺和设备的技术研究工作。目前华中科技大学、西安交通大学、北京隆源自动成型系统有限公司、东北大学和清华大学等单位在 RP 原理和工艺、材料和成形设备的研究、开发和产品化等方面作了大量卓有成效的工作。南京航空航天大学、北京航空航天大学、中国华侨大学、哈尔滨工业大学、大连理工大学、北京航空工艺研究所、上海交通大学、昆明理工大学、天津大学、江苏大学、河北工业大学、华南理工大学、南京理工大学、山东大学、吉林大学、北京工业大学、同济大学、北方交通大学、湖南大学、广东工业大学、北京大学、深圳职业技术学院、中国医学科学院、西北工业大学、中南大学等多家高等院校和科研机构也正在陆续开展 RP 工艺、材料和应用方面的研究工作。

随着各国 RP 技术的发展，国际性的 RP 协会应运而生。快速成形协会国际联盟 GARPA（Global Alliance Rapid Prototyping Association）在美国 Terry Wohler 教授和香港 Ian Gibson 博士的倡导下于 1998 年正式成立。GARPA 是在各国政府注册的 RP 学会（协会、技术委员会等）联盟，现有 17 个会员国，国家（地区）和协会负责人如下：

美国 SME	Boris Fritz	Chairman
英国 UK	Graham Truman	Chairman
瑞典	Berndt Homer	
德国（NC 分会）	Michael Junghanss	
日本	Igata Tetsuzo	
中国	Yongnian Yan（颜永年）	Chairman
芬兰	Jukka Tuomi	Chairman
法国	Alain Bernard	Vice President
加拿大	Vesna Cota	President
丹麦	Bent Mieritz	
意大利	Luca Iuliano	
韩国	Dongyol Yang（杨东烈）	
南非	Deon de Beer	
新西兰	Walter Kruf	President
爱尔兰	Michael Murphy	
澳大利亚	Noel Frost	
中国香港	Ian Gibson	Vice Chairman
西班牙	Albert	Riera

我国机械工程学会特种加工分会快速成形技术委员会是 GARPA 最早的支持者之一，积极参加 GARPA 的各种活动。GARPA 每年两次活动，一次为峰会，与各国 RP 年会同时召开；另一次在法兰克福的德国模展（Euro－Mold）上以聚会（Party）的形式召开。GARPA 的这些活动促进了各国学者间的学术交流，同时也有利于行业内的合作和商业活动。RPML 为通过网络交换有关快速成形制造的信息网站，为了更好发挥其作用，正在筹建信息数据库（Information Database）。从 1998 年至 2008 年的 RP 峰会（包括准备召开的峰会）如下：

1998 年	Dearborn，Michigan	美国
1999 年	Chicago，Illinois	美国
2000 年	Paris，France	法国
2001 年	Stellenbosch	南非
2002 年	Beijing	北京
2003 年	Birmingham	英国
2004 年	Bloemfontein	南非
2005 年	拟	意大利
2006 年	拟	芬兰
2008 年	拟	北京

本篇前 10 章的内容主要集中在快速原型制造基本原理、科学内涵、主要工艺方法和核心技术链，并深入浅出地从离散论方法学和数字化方法的角度分析快速原型制造的成形原理。快速原型制造的基本原理和方法就是整个快速制造即快速成形学科和技术的基本原理和方法，在讨论各种基于离散－堆积成形原理的成形方法和工艺时，都可以从快速原型制造中找到相应的科学依据和技术支持。可以说，快速原型制造是快速制造的基础，因此命名为快速原型。第 11 章至第 19 章的内容主要集中在各种使用功能零件或器件的快速制造，如金属零件、生医器件、组织工程支架、模具、铸型等的快速成形制造。从本质上讲，这些都是在快速原型制造工艺的基础上发展起来的快速制造工艺和方法，从而命名为快速制造。总的来说，快速原型更强调基础性和技术共性，快速制造更强调实用性和先进性。两者结合，形成全篇：快速原型与快速制造。

编写：颜永年（清华大学）



第2章　离散－堆积成形原理

如何制造具有复杂曲面（如自由曲面）的三维实体一直是制造业所关注的制造科学和技术问题。20世纪50～60年代发展起来的数控技术是解决此问题的突破性方法，即提高运动控制的维数（由二维联动发展到六维联动），使切削刀具自动地按非常复杂的空间轨迹运动。这种机床就是当代的加工中心，它能切削毛坯完成具有复杂曲面三维实体零件的加工。这是一种“升维加工”方法，即随着零件拓扑结构复杂度的增加，增加运动控制（motion control）联动的维数，以保证刀具按更复杂的空间轨迹运动。其优点是可直接完成金属零件的加工，精度高且表面光洁度好，但这种制造方法的缺点也是非常明显的。

1）设备复杂程度和设备制造成本以及加工零件的加工成本均与维数呈指数关系上升。

2）无法加工具有内流道、中空或半中空的零件。

3）刀具干涉问题限制了加工零件的种类。

4）由于刀具都有圆角半径，无法完成具有“清根”的形状。

5）编程工作量大，专业性强，对操作人员要求很高。

6）零件加工与零件的材料和毛坯的制备是完全分离的过程，因而无法完成非均质零件，如具有材料梯度之零件。

快速原型技术与数控铣削加工技术不同，它反其道而行之，采用“降维制造”的概念，它不追求“刀具”复杂的运动轨迹；相反，“刀具”仅具有2.5维联动的能力。该技术之核心在于采用低维运动控制系统，制造零件的“单元”，然后将单元“有序叠加”起来，而形成复杂的三维实体。为了保证零件“单元”的制造和“有序叠加”，显然首先需要将零件离散成单元并知道单元迭加的顺序和位置，这就要采用数字方法，在三维实体或曲面CAD模型的基础来进行离散。根据单元的需要可以离散成面、线和点。离散与堆积互为逆过程，如图6.2-1所示。

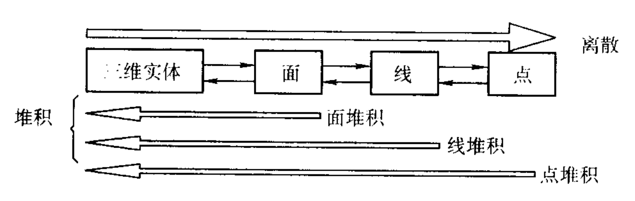


图6.2-1　离散－堆积示意图

由于2维运动最多可以制造出一个“面单元”，且可直接采用连续流程制造的片材或箔材切割成面单元，然后堆积成三维实体，可见“面”在离散－堆积成形制造中的重要作用，故离散－堆积制造又称为“面基制造”（layered manufacturing）。基于升维制造的切削加工的缺点正是基于降维制造的离散－堆积成形的优点。

1）不存在刀具干涉的问题。从原理上讲，制造工艺与零件复杂程度无关，因而具有最高的柔性；从设计—制造全过程来看具有很好的快速性，这也就是快速原形——RP技术名称的由来。

2）可制造具有内流道（如叶片和模腔冷却系统）的零件。

3）可制造具有“清根”形状的零件。

4）可完成非均质材料的成形。此时，材料制备、毛坯成形与零件加工是并行完成。

5）完全自动，对操作人员要求较低。

离散－堆积成形的缺点如下。

1）金属的高熔点、相变热力过程及收缩或膨胀特性之复杂以及金属单元联结等困难，使得将离散－堆积成形原理直接用于金属单元的制造和单元的堆积十分困难。

2）堆积成形件的精度（尺寸、形状及表面精度）与成形效率有待统一。通常用于堆积的单元尺度为0.05 mm至0.15 mm，显然其精度受到一定的限制。如果操作原子（10^{-7} mm的尺度）进行堆积，显然可达到一切加工方法无法相比的加工精度，但成形效率无法忍受。目前操作原子进行制造仅限于特殊功能件成形的领域。当前有许多研究项目致力于解决精度与效率的统一，学术界与工程界都期待这一技术和科学瓶颈的解决。

1　去除成形和受迫成形

快速成形技术是基于离散－堆积成形原理的成形方法。在研究离散－堆积成形原理前，有必要回顾一下传统的成形原理和方法，即去除成形和受迫成形。

从远古至今，人们在长期的生产劳动中发展出两种最基本的材料成形加工方法，它们是现代制造科学、技术与工程的基础，即“去除成形”（subtractive forming）和“受迫成形”（forced forming）。

去除成形，即去除裕量材料而成形。从人类的祖先非洲智人敲击石块制造石器到现代多轴联动的高速加工中心铣削精密零件均属同一成形原理。这种从整体材料上分离下多余的材料（裕量材料）以获得人们要求的形状、结构、精度和表面粗糙度的成形方法伴随着人类从远古进入现代文明时代。非洲智人制造简单的石器与现代人采用数控机床磨削一件精密丝杠在成形学原理的概念方面没有差别。现代机械制造科学将车、铣、刨、磨、电火花加工、高能束以及电弧（火焰）切割、化学腐蚀加工、蚀刻加工和掩膜加工等均视为去除成形。

受迫成形，即材料在型腔约束下成形。利用材料的可塑性，在模具或砧子的约束下，按模具型腔的形状与结构而成形，这就是模锻（如飞机涡轮盘、起落架，汽车曲轴等）、挤压（如铝合金冷挤，高温合金的热挤压开坯）、轧制（包括斜、横轧，如型钢和板材的轧制、轴类零件的轧制等）、辗压（包括摆辗，如盘形件和锥形件的辗压）以及拉拔（如异形型材和管材的拉拔）成形。自由锻是在一种特殊的模具——砧子（平砧、型砧等）约束下积累式渐变成形。在古代，铁匠用锤子、砧子将锻炉中加热的金属锻打成形即属此类成形。

另一类发展得更早的受迫成形，是在铸造金属的铸型（如砂型）之约束下的成形。此种材料成形原理是利用高温液态金属优良的可铸造性（如流动性）在铸造型腔的约束下按照型腔的尺寸、结构和形状等而成形。铸造受迫成形的记载可追朔到史前，如青铜时期。铸造成形经长期的发展，已形成当代机械制造中最基本的成形工艺，是现代工业中不可缺少的成形方法。

陶器与瓷器的成形从成形科学的定义上来看，也应归并在受迫成形一类。如手工制作陶坯，即采用简单的工具积累渐进式成形或采用复杂的模具约束陶瓷浆（粉）料而成形。

粉末冶金和粉末注射成形均是十分典型的受迫成形。

焊接（连接）成形是一种特殊的成形方式，通过受迫成形和去除成形而获得的毛坯、半成品、零件、部件通过焊接

方法连接起来而完成成形。显然，从成形学的定义——通过物理学、化学和生物学的方法使材料发生形状、结构和内部性能的变化而获得特定的结构、形状以及要求的使用功能来分析，焊接成形不构成一种独立的成形方法，它是去除成形和受迫成形方法的一种延续。在现代工业体系中，焊接工艺是一种极为重要的材料和构件的连接工艺。

考察去除成形与受迫成形，可以得出如下特点。

1）材料的成形过程与其制备过程是分离的　去除成形是对通过受迫成形获得的坯料进行加工，显然它与材料制备过程是不同的过程；受迫成形与成形材料的制备关系十分紧密，成形过程可以改变材料内部性能，但仍属两个范畴。前者除了关注材料内部性能，还关注成形后的形状、结构和精度；后者主要关心材料内部性能，利用成形过程改善材料内部性能可将材料制备与材料成形两个不同的过程联系起来，显然它们强调的重点不同，仍属两个工业领域。利用材料可塑性的受迫成形，显然是在材料制备过程结束后方能进行的过程，因而与材料制备过程是分离的。将液态金属浇入铸型而成形也是在完成材料（钢水、铁水等）的成分控制、合金化等工艺处理后才进行的。在铸型中液态金属的凝固涉及诸多工艺和材料问题并不属材料制备的范畴。在受迫成形范畴内，材料制备过程基本上是先于材料成形过程。焊接熔池的成分控制与连接过程是同时进行的，但此处的材料成分控制并不是材料制备的含义。

2）成形的信息过程与物理过程（有时包括化学过程）是分离的，这是去除成形和受迫成形的另一个显著特点。成形的信息过程包括被成形件的设计、成形工艺的制定、成形过程的实时控制等；成形的物理过程是指使材料获得形状改变、内部组织和性能的变化以达到要求的结构、外形、精度、表面质量以及所要求的特殊功能的物理作用（包括化学作用、生物作用等），如外力、温度、电、磁、声、光以及辐射等的作用。成形的信息过程基本上要预先完成，成形过程中仅作适当地实时修改。信息过程的作用主要体现在对刀具（模具）和成形条件及环境的直接或间接控制，对材料的作用则是间接的。根据现代成形学理论，设计与制造过程最终表现为信息过程与物理过程；同时，信息过程与物理过程结合的紧密程度决定了成形方法先进性的水平。

去除成形与受迫成形历经长期演化与进步形成当代机械制造的主体。虽然计算机技术、数字模拟与仿真及数控技术等的大量采用，使当代的切削加工、锻造、铸造和焊接等工艺与设备已达到极为先进的水平，但从成形学原理来考察，仍未超越传统而古老的去除成形和受迫成形原理的范畴。

2　生长成形

在自然界，生物（动物、植物和微生物）的生长，事实上也是一种成形，但与上述成形是不同的成形概念、原理和模式。从成形学的角度考虑，生长过程是一种成形过程，一种十分缓慢的成形过程。有机材料（由碳、氮、氢、氧、磷等元素组成）被“加工”成具有特定功能（生理、生化和力学功能）的三维复杂结构，这种加工是通过细胞和分子、原子的自组装和自装配完成的。一个人体骨盆、一叶肝脏或是一根树杆，它们不仅是一个活的生命体，从制造科学成形学的角度看，它们是由材料组成的具有特定结构和特定功能的三维实体，因而其生长过程也是一种材料的成形加工过程，我们称为生长成形（growth forming）。生长成形的特点如下：

1）生命体的生长是通过对“材料单元”——细胞的“装配”（自组装）而完成的。与对整体材料（坯体）的某些部分之切削去除而成形和整体材料（固态、半固态、液态和流态）在型腔的约束下（力的传递与热的交换）而成形完全不同。通过材料单元体（细胞）的装配而成形显然开创了一种新成形思路。成形单元体的尺度与成形体的尺度和性质有关。人体细胞的尺度从 10 ~ 1 000 μm 不等，更大的细胞也不少见。在自然界中，通过非人工因素而成形，即材料单元——细胞通过自组装而成形是可以想象的、合乎逻辑的方式。当然，细胞并非单质体，而是一个复杂的生命体，但在研究成形方式时则可以抽象为一个“材料单元”。

2）成形过程中的物理过程和信息过程是高度统一的，而非去除成形与受迫成形中的分离状态。细胞核中的 DNA 控制了细胞的分化与分裂（复制），以及细胞的自组装过程。生物体千变万化的结构和千奇百怪的功能都是 DNA 控制下的自组装过程的结果。控制的中枢和依据均来自材料内部——细胞核中的 DNA。外界的“意图”只能启动或停止这个自组装过程，而不能改变这一过程，成形的信息过程与成形的物理过程已高度统一于成形的材料（细胞）之中。当然，基因受外界影响发生突变，会影响这一“成形”过程。然而这种变化了的基因仍在细胞核中控制细胞内的各种生理、生化过程和细胞的自组装过程，也就是说，此时成形的信息过程与物理过程仍是高度统一的。

3）从细胞自组装的过程来看，并不存在独立的材料制备过程，细胞的分裂并长大是伴随着化学元素的输运同时进行的，也就是说传统成形方法中材料制备与材料成形这两个分离的过程在生长成形中已高度统一了。

3　离散方法与离散论方法学

离散是客观事物存在的基本形式之一。事实证明，解决复杂问题的方法不仅要采用系统论方法，而且同时必须采用离散论方法。从思维方法来说，往往把对象进行有限细分或无限细分，将更逼近问题的解答，将使复杂问题处理起来更简单。在数学中微积分方法就是先化整为“零”，然后积“零”为整。古代人们把圆周分割成有限多个直线的多边形，从而创立了圆周率的近似算法，这些都属于离散论方法在数学中的自觉或不自觉的应用。材料力学中经常采用取隔离体的方法求内力和弯矩等；近代有限单元法则是采用计算机把复杂结构与场域分成许多小单元进行内部应力场和温度场等的计算，然后根据物理定律进行叠加。在现代控制理论中采用 Z 变换的离散方法研究动态过程。离散论方法在现代科学技术各门类学科的应用都被理论和事实证明是非常行之有效的方法，在实践中发挥了巨大作用。

当然，在采用离散论方法时，不要忘掉系统的总功能、总目标以及系统的结构性与层次性，否则将使系统变有序为无序；在采用系统论方法时，也不要忽视离散论方法的重要性。在系统论方法中，总的步骤被离散为各个分步骤进行，所以实质上也采用了离散论方法。

离散方法可以提升到哲学与方法论高度，以进一步扩大其应用范围和作用，这就是离散论方法学。离散论方法学是指将复杂的事物或广义系统离散成有限个或无限个简单事物或子系统来分析、处理，以求得总体的近似特解与圆满解决的方法与理论。快速成形技术则是离散论原理在成形科学领域的发展和具体应用。

快速成形技术中的离散－堆积基本思路与数值积分中把任意函数的积分问题转化为求解并累加一系列简单图元（如矩形、梯形等）的面积问题一样。在数值积分中，由于采用分段（积分区间的细分）求积分的办法，使求解积分值的形式发生了实质性变化，把求解原函数运算转化为简单代数运算，而数值积分的结果却可以不断逼近积分真实值。在快速成形中，采用了离散的办法，也使制造的形式和内容发生了实质性变化，把三维零件制造转化为一系列简单单元体制造，而单元体制造从某种意义上讲已经突破了零件制造的范畴。尽管单元体的制造机理与零件制造不同，但正如利用数



值积分方法可以使积分值不断逼近真值一样，利用快速成形工艺也同样可以制造出从形状和性能两方面近似真实零件的原型，甚至零件。

绝大多数现有的 RP 工艺都是将三维实体离散成二维层片然后叠加成形的。实际上，从离散－堆积原理本身出发，三维实体在离散过程中可沿一至三个方向进行不同的分解，生成形体的一个个截面、截线和截点，称之为离散面、离散线和离散点；在进行堆积过程时，首先要相应地分别进行二维单元体（面）、一维单元体（线）和零维单元体（点）的制造，然后将这些离散体相应进行一维、二维和三维的累加，即将它们依照原先的顺序堆积还原，转换成需要的三维实体零件，见图 6.2-2。抛开具体的快速成形工艺约束，仅考察离散方法本身时可以发现，还可有一种离散方法，即将三维实体离散成若干个两维半或者小的三维单元体，在进行实体制造时不再在层状单元体的基础上堆积成形，而是直接制作两维半或者小的三维单元体，然后堆积成形。前述 SDM 工艺可视为一种离散成体的变异方法，只是其单元体本身的制作也是采取逐层堆积的方法，然后通过铣削成形精确的小三维单元体的轮廓，若干个三维单元体的堆积即得到需要的三维实体。当然，如果可采取其他方法方便地制作出三维单元体，则将简化成形的堆积过程，提高成形效率。

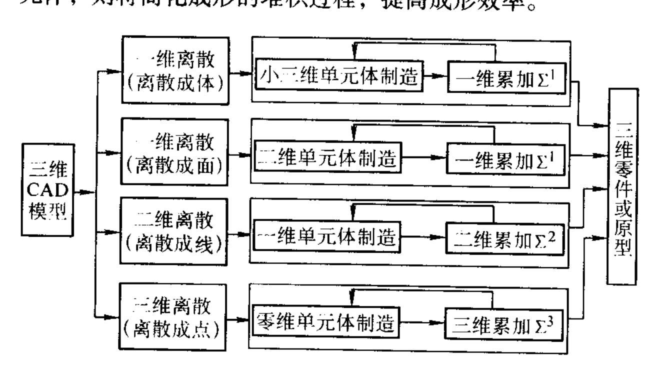


图 6.2-2　三维实体的不同离散－堆积成形途径

4　数字化方法与数字化成形

离散化的终极发展则是数字化，因为研究对象通过离散后还可能是模拟量的集合，而数字化则是将研究对象彻底离散成数字量的集合。离散数字方法和数字技术是数字计算机的理论和技术基础，而数字计算机和数字控制技术则进一步促进了离散论方法乃至数字化方法在各行各业中的广泛应用。数字计算机从出现到广泛应用不过几十年的时间，但它所带来的冲击远大于第一、二次工业革命，使人们的生存方式进入了数字化的时代。

对于制造业来说，设计过程和制造过程中的信息通过数字表述后，产生的计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）技术加快了设计与制造过程的速度，提高了这一过程的柔性和可控性，为制造业带来了一场革命。CAD 和 CAM 技术可视为一种数字驱动的设计和制造技术。而快速成形技术则是继 CAD 和 CAM 技术之后的又一项为设计和制造带来巨大变革的新技术。

传统成形方法可视为一种特殊成形方法，它在三维空间上形成一个与零件 Ω 域对应的特定形状的“模具”来得到所需的形状，成形过程可被视为一种典型的“模拟成形”方法。在成形过程中，不仅材料过程与能量过程是模拟式的，而且信息过程也主要是利用人来进行处理，并以形状信息等方式物化于工具中，也是一种模拟式的，这是制造业和成形技术的初级阶段。与手工制造过程（如打铁等）乃至手工雕刻工艺品等相比较，这类成形方法由于有了机器的辅助而大大前进了一步，为相区别，可将其分别称为“手工模拟成形”和“机器辅助模拟成形”。

数字计算机技术在制造业中的广泛应用实现了信息过程的数字化描述，从而大大加强了信息过程与物理过程之间结合的紧密程度，由此产生了计算机数控（CNC）加工技术、柔性制造系统（FMS）技术、计算机集成制造系统（CIMS）技术和数字化模拟技术等。数字驱动设计和数字驱动制造仅仅实现了信息过程的数字化以及对成形过程工具的数字化控制，对于成形过程中材料的转移这一物理过程仍然同前述成形方法一样，是一种完全被动的、未经数字控制的方法，材料是成形过程的最终作用对象和目标，所以从这一角度来看，这类方法仍然属于模拟成形，或者说是“数字驱动模拟成形”。快速成形技术则不仅实现了信息过程的数字化，而且实现了物理过程的数字化，材料的转移过程是利用材料的叠加性，在数字化信息控制下，采用按需添加的方式，在 Ω 域内数字化地分步将材料逐渐堆积起来成形（这进一步提高了制造过程的柔性）。所以，从成形过程中材料转移的特征来看，快速成形技术又可称为“数字化成形技术”。

考察图 6.2-2 所示的各种离散－堆积成形途径，其中基于三维离散（离散成点）和三维堆积的成形途径可认为是一种完全的“数字成形”，不仅信息过程是数字化的，而且材料的转移过程也是建立在以零维（点）单元体制造基础上的材料累加，是一种完全意义上的空间数字成形。比如，Sanders 工艺成形时是通过脉冲式控制完成材料转移，每个脉冲对应一材料微滴（droplet），即一个材料单元，堆积过程是点状材料的三维有序累加过程，可认为是一种“数字成形”。而其他离散－堆积成形途径，包括二维离散和一维离散，则不是完全意义上的“数字成形”，而是一种“数字化”的成形。显然数字化程度越高，对成形过程的材料和能量流动的控制也更精确，成形精度也越高。IBM 公司的科学家曾采用对氙原子进行移动操作的方式拼出“IBM”三个字母，这可认为是一种真正的数字成形，而目前的快速成形工艺大多数还只能认为是一种“数字化”成形。

正如前述，信息过程与物理过程高度统一的生物体的形成和生长是成形的最高级阶段。在此阶段信息融入材料中，作为“材料”的每一个细胞都是载有信息的全息单元。可以预见，模仿自然界中生物生长方式而成形，则将产生新的、更好的成形技术，即生长成形（仿生成形）。仿生成形将是生命科学、信息科学和成形科学发展到一定程度后互相借鉴融合的结果，既离不开生命科学本身的发展，也离不开信息和数字技术的发展。按照上述数字成形的角度分类，该类成形可认为是一种“数字仿生成形”，是成形的更高级阶段。图 6.2-3 所示即为三维实体的不同成形途径及其数字成形角度的分类比较，从上到下按其产生顺序依次排列。可以看出，数字化是信息时代成形方式的重要发展趋势之一。

由图 6.2-3 可知，成形技术的发展趋势之一就是数字成形。目前的各种快速成形工艺基本上可认为是一种“数字化”的成形方式，是充分利用数字方法控制成形材料按序堆积的成形技术，它是成形技术的重要发展方向之一。

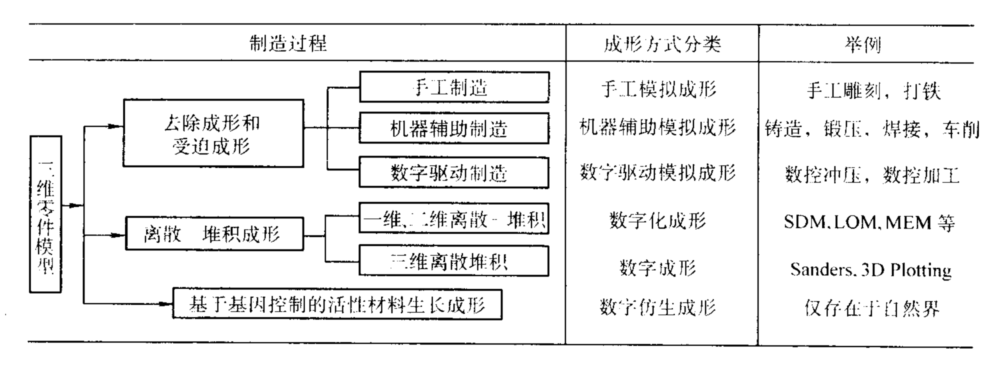


图 6.2-3 三维实体的不同成形途径及其分类

5 基于集合论的离散模型

集合论是离散数学的重要组成部分，集合的理论在编译原理、开关理论、信息检索、形式语言、数据库与知识库、CAD、CAI 以及人工智能的各个领域中得到了广泛的应用。集合论的创始人 G. Cantor 对集合的定义是：凡是在我们的感觉或思维中可以明确区分的对象物，把它们看成是一个整体，这个整体，我们就称它是集合（set），其中的"物"就称为这个集合的"成员"或"元素"（element）。下面的分析以经典集合论为基础，不涉及模糊集合论。因此，集合是由它所包含的元素完全决定的，元素与集合的关系也是非常明确的。

对于三维实体（Ω）（快速成形中一般主要考虑满足其几何形状和结构要求），在对其进行分层离散后变成了 Ω'，设离散成 n 层，层片用 L_i 表示（$i=1, 2, n$），则 Ω' 是这 n 个层片的集合：

$$\Omega' = \{L_1, L_2, \cdots, L_n\}$$

在堆积过程完成后便复原成三维实体，堆积过程相当于对这 n 层层片进行特殊的并运算，即要考虑层片在 Z 向的高度，而且是有序并运算（以 ↑ 表示），则

$$\Omega = \uparrow (L_1 \cup L_2 \cup \cdots \cup L_n)$$

对于每个层片轮廓，一般均包括若干个外环和内环，设第 i 层的外环集合为 OP_i，内环集合为 IP_i，则第 i 层总的轮廓 P_i 是这二者的集合

$$P_i = \{OP_i, IP_i\}$$

对于层片的二维几何区域，可将环的含义引申为它所包含的区域，如果考虑到环的方向含义，则

$$P_i = OP_i \cup IP_i$$

为方便进一步计算，将内环转换成外环，则层片零件区域相当于对外环集合与内环集合的差集

$$P_i = OP_i - IP_i$$

设第 i 层的外环与内环集合分别包含 M_i 和 N_i 个外环与内环，即有

$$OP_i = OP_{M_1} \cup OP_{M_2} \cdots \cup OP_{M_i};\quad IP_i = IP_{N_1} \cup IP_{N_2} \cdots \cup IP_{N_i}$$

6 快速成形工艺过程的离散分析

RP 成形过程可分为离散和堆积两个过程，如图 6.2-4 所示，离散过程将三维实体的 CAD 模型沿一定方向分解，即将连续的实体（表面），按一定厚度采样，分解成不连续的层片，得到一系列截面数据。各种工艺根据各自的工艺要求，对截面数据进行处理（如填充，偏移等），通过合理的工艺规划，生成控制成形工具的运动轨迹。在堆积过程中，成形工具在运动轨迹的控制下，加工出层片，并将新生成的层片与已成形部分堆积、连接，层片生成与堆积连接过程循环往复，直至零件全部加工完成。离散和堆积是 RP 工艺特有的两个过程，离散是堆积的准备和依据，堆积是离散的复原，它们相辅相成，实现零件的数字化成形。

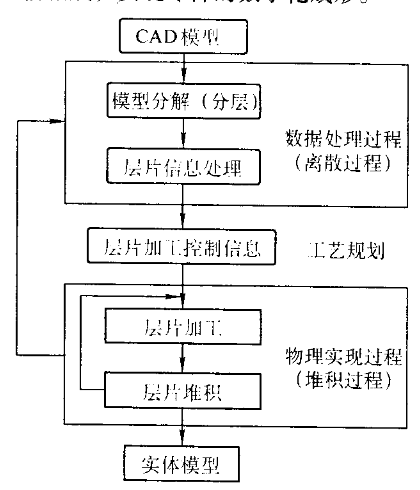


图 6.2-4 RP 工艺的基本过程

显然，离散过程是一种数据处理过程，对三维 CAD 模型进行离散化的数据处理，而堆积过程是一种物理实现过程，通过物理实体的运动完成层片的堆积成形。在这两个过程中间则需要根据各种 RP 工艺的不同要求进行合理的工艺规划，主要是根据成形工艺特点和用户要求合理制定工艺规则，生成堆积单元的运动轨迹，选择合适的工艺参数等。由此可见，工艺规划是联系离散过程（数据处理过程）和堆积过程（物理实现过程）的桥梁，是实现从离散时的信息取样到堆积时的信息还原的信息处理过程，体现了不同 RP 工艺的区别和特点。

图 6.2-5 进一步采用域映射分析的方法描述快速成形工艺过程，它将快速成形过程看成是从设计概念域到零件域多个域之间的映射过程。这种方法能更直观地描述快速成形过程中每一步的转换情况、转换实质以及对该转换的控制，便于对其工作过程进行详细的研究，所反映的是各个转换环节的输出结果和目标。

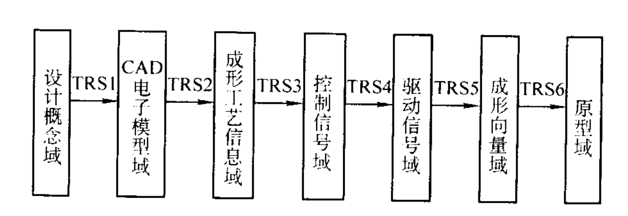


图 6.2-5 RP 过程的域及其映射变换

1）设计概念域　设计者的一系列设计构思，它既可以

是设计者根据市场需求所产生的新产品构想，也可以是对现有产品的改进设想，或者是各种反求工程方法、图像处理方法所得到设计的概念模型。

2）CAD电子模型域　在计算机中建立的用于定量描述设计构思的电子数据模型，比如PRO/E等三维软件中建立的零件模型，或者对卫星遥感数据进行处理所得到的地图模型等。

3）成形工艺信息域　根据成形工艺特点和要求对CAD电子模型进行信息处理和工艺规划而得到的直接用于成形过程的各种信息的集合，包括层面扫描路径信息、工艺流程信息、材料控制信息等。

4）控制信号域　由监控计算机和其他工作单元的控制器所产生的用于控制、协调各工作单元工作的所有物理控制信号的集合，如各轴运动控制信号。

5）驱动信号域　由控制信号经放大、变换等处理后产生的用于直接驱动工作单元的执行器完成特定成形动作或实现特定成形状态的所有驱动信号的集合，如各轴电动机的驱动信号。

6）成形向量域　在快速成形工艺中，直接作用于材料、堆积机构或对成形件性能有明显影响的所有几何量或物理量的集合。要实现堆积成形，就至少包括四个成形向量：x、y、z三个控制各轴基本运动的几何向量和控制成形能量及工具的物理量，后者也可简称为堆积向量。在具体RP工艺中，几何向量可以不只三个，就像普通数控加工领域的多轴加工机床一样，为了实现加工运动的灵活性，可以使用五轴运动控制来实现刀具在实际三维空间中的运动。堆积向量也可以不只一个，例如在MEM工艺中，出丝速度由送丝电动机控制，出丝启停由阀门开关控制，应视为两个堆积向量，喷头温度梯度和环境温度梯度也应同样视为两个堆积向量。

7）原型域　经过堆积完成的基本性能和形状尺寸满足要求的原型，是对原始CAD电子模型在既定工艺条件下的最优近似。这是成形过程要实现的目标，也是域映射变换的最终目标。

上述各个特定域之间的转换是由相应的各域映射器完成的，如计算机、控制器（控制信号发生器）、驱动器（驱动信号发生器）和执行机构。前一映射器的输出结果作为后一映射器的输入，这样级级之间串联便构成了从设计概念到最终零件或模具的快速转换系统。其中，计算机是一个通用信息处理器，它实现抽象概念到具体化逻辑模型的转换，包括CAD电子模型建立、工艺规划信息和控制指令生成等。

通过分析RP工艺过程及其域映射模型可以发现，成形工艺信息产生是其关键组成，主要包括三维CAD模型离散（分层）、工艺规划和控制指令生成三部分，而工艺规划在其中起着核心作用，它继承了零件几何信息和要求，规定了信息对能量和材料的控制作用，是成形系统联系CAD与CAM的承上启下的桥梁。

7　离散–堆积成形与其他成形原理的比较

离散–堆积的成形原理形成一种成形技术是近20年的事情，特别是在计算机辅助设计（CAD）及相关数据处理技术、计算机数控（CNC）技术、三维重构（反求和逆向工程）技术以及制造过程的模拟仿真技术发展并普及的今天才得以实现，形成当代工程制造的一个独立分支。离散–堆积的成形原理对科学技术进步的影响是十分深远的，从下面的潜在应用可清楚地看出。

如果将细胞视为离散的单元，则堆积活的细胞或细胞簇（包括其外基质材料）构成三维结构——器官前体类似物（analogy organism preqursor），一种亚结构（meta–structure），可称为器官的前体（organism preqursor），经体内和体外的培养及训练可望形成具有特定生理生化功能的组织或器官，这种在器官CAD模型驱动下的受控组装，其成形速度是自然生长条件下细胞自组装——器官生长速度的数百倍至数千倍。当然，实现细胞的堆积成形，还有许许多多细胞学、生物学、材料科学以及制造科学方面的障碍有待克服。

用大功率的激光束、电子束以及其他高能束熔覆或烧结金属堆积成形是特种合金材料成形的新工艺，当前的研究成果已显示出该方法具有巨大的生命力。这是一种金属熔滴单元的堆积成形，一种典型的受控组织堆积成形。美国AeroMet公司采用19 kW大功率CO_2激光器根据激光粉末熔覆工艺开发出直接金属快速成形工艺LAM（laser additive manufacturing）。

将合金粉末和金属丝材熔化形成一颗熔融的合金微滴单元（离散），其功率远远小于重型锻压设备锻造铸锭或钢坯所需的功率，前者仅数千瓦，后者则达数千千瓦，相差千倍，其他各种设备和工厂投资也是数百倍之差。重型铸造行业受铸件木模的设计、制造和存放的困扰是众所周知的。采用木模翻砂造型，获得合格的铸造用砂型也是一个相当费工费时的过程。本书第16章讨论的无木模铸造工艺PCM就是直接将树脂砂堆积成铸造用砂型的工艺，它无需木模，是铸造技术中采用离散–堆积成形的典型工艺。由于不用木模造型，无需将木模从砂型中取出，不存在拔模斜度等，因而提高了铸件的精度并节省了金属用量。从上述实例我们已看到极富挑战性的离散–堆积成形在重型加工工业中的作用。

离散–堆积成形是介于传统成形（去除成形和受迫成形）与生长成形之间的一种新颖成形方法，它将材料离散成材料单元，然后在CAD模型的直接控制下，有序地堆积组装此材料单元而形成任意复杂的三维实体。

与受迫成形方法相比，它无需专用工具（如成形模具——锻模、冲模、注塑模、注射模、铸造造型木模）、专用型腔（如铸造用砂型）以及其他专用工装，因而具有最大的工艺柔性，特别适于个性化制造、批量定制以及单件和小批量制造。

与去除成形方法相比，离散–堆积成形方法适于任意复杂（形状和结构）的成形件；而去除成形方法受最小刀具半径的限制，无法“清根”，无法高效、整体完成具有内流道、中空和复杂内型腔的零件；去除成形比较适于单一材料的成形，无法完成具有材料梯度的零件，而对于离散–堆积成形则不存在原理性的困难；去除成形需要各种刀具、卡具和工装的支持，特别是对于在形状、结构和精度方面有特殊要求的零件，这种要求将大大延长工期，增加制造成本。

在零件CAD模型直接驱动下，通过材料单元的受控组装，完成成形过程的成形理念是成形学向生长成形方向发展的一种进步，也是成形原理、方法和技术的进步。

在对四种成形原理分析的基础上，表6.2-1就其优缺点进行了比较。

从表6.2-1中可以看出，去除成形发展的年代最久、精度最高、柔性较差并与成形信息过程结合程度较低；受迫成形发展年代虽晚于去除成形，但也是历史悠久的成形方法，其精度低、柔性低但成形复杂结构的可能性要高些，与成形信息过程相结合的程度同样很低；离散–堆积成形是近代制造科学技术在材料加工领域中应用与发展的体现，是制造科学技术向生长成形方向的一种飞跃。从制造的物理过程与其信息过程相结合的观点来分析，离散–堆积成形是最接近生长成形的成形方式。

离散–堆积成形将作为21世纪的重要成形方法而发展，随着此种成形原理与技术与传统制造工艺进一步融合以及信息技术、生物技术、材料科学的进步，必将促进制造科学向更新更广阔的领域迈进，其价值将会超越制造科学的范畴，



为更多的工程技术人员和科技工作者所接受。

表 6.2-1 四种成形方式的对比分析

名称	存在年限	定义	当前精度	柔性	结构复杂性	材料梯度	材料制备/材料成形	材料成形的信息过程/物理过程	成形信息孕育材料之中
去除成形	数十万年	去除裕量材料成形	最高	较低	低	差	完全分离	完全分离	无关
受迫成形	数千年	型腔约束成形	较低	低	较低	差	分离	完全分离	无关
离散－堆积成形	20年	单元受控组装成形	较高	较高	高	最好	较统一	较统一	某种关系①
生长成形或仿生成形	未来	细胞自组装成形	较高	最高	最高	好	高度统一	高度统一	完全孕育

① 当受控组装与自组装相结合时成形信息相当程度上已孕育于材料之中了。

编写：颜永年（清华大学）

第 3 章　RP 技术链

RP 数据处理技术链（data processing technology chain）主要包括数据准备（data preparation）、成形方向（forming direction）、支撑结构（supporting structure）、分层技术（slicing technology）和扫描路径填充（path planning）等内容，如图 6.3-1 所示。

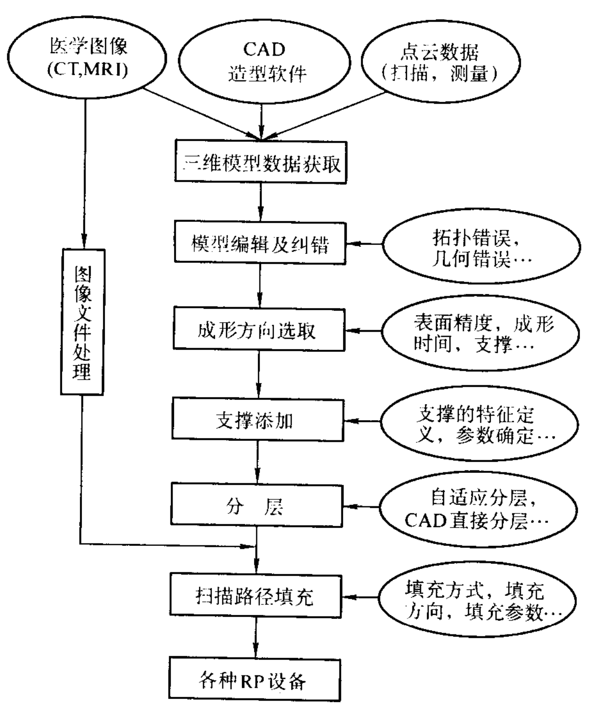


图 6.3-1　RP 数据处理技术链

1　三维数据模型获取

获取实体的形状轮廓信息是快速原型工艺的前提。根据实体的特点，可以通过 CAD 直接设计或逆向工程技术获取实体三维数据模型。

1.1　CAD 直接设计

对于表面形状较为规则的工业零部件，一般在 CAD 造型系统中进行设计。目前 CAD 软件造型的方法主要有实体造型和曲面造型两种。

1）实体造型　实体造型是目前大多数 CAD 软件采用的主要造型方法之一。它是以立方体、圆柱体、球体、锥体、环状体等基本体素为单元体，通过几何运算，生成所需要的几何形体。这些形体具有完整的几何信息，是真实而唯一的三维物体。从内容上看，实体造型包括两方面的内容：即体素的定义与描述，以及体素之间的逻辑（并、交、差）运算。

2）曲面造型　对于像汽车、飞机、模具、轮船等这些复杂曲面的设计，采用实体造型方法往往难以取得令人满意的结果，而用曲面造型就比较方便。曲面造型主要研究曲线和曲面的表示、曲面的求交及显示等问题。常用的参数曲线有三次样条曲线、三次参数样条曲线、贝塞尔曲线、B 样条曲线和非均匀有理 B 样条曲线（NURBS）。常用的参数曲面有平面片、圆柱面、直纹曲面、回转面、贝塞尔曲面、B 样条曲面、孔斯曲面和 NURBS 曲面等。

从目前 CAD 造型技术的发展趋势来看，实体造型已经和曲面造型开始结合，并将形体的表示统一到实体几何构造（CSG）和边界表示（B－rep）上来，从而使几何造型系统可以构造出从平面立体到自由曲面体的各种形体。目前常用的 CAD 造型系统有 Pro/Engineering，Unigraphics，Catia，SolidWorks，SolidEdge 等；常用的曲面设计系统有 Alias，Rhino 等。

1.2　逆向工程

对于形状复杂，难以在 CAD 系统中造型的自然形体，如古典建筑、雕塑、生物体器官等，通常利用逆向工程技术获取数字模型。三维测量技术是逆向工程中获取实体表面信息的主要方法之一。根据测量原理不同，三维测量技术可分为接触式测量、非接触式测量和破坏式测量，图 6.3-2 显示了三维测量技术的分类。

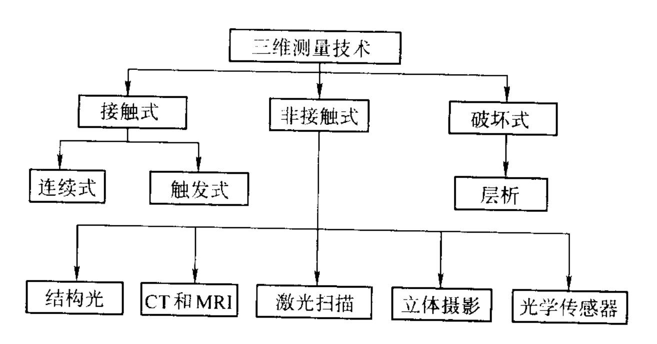


图 6.3-2　三维测量技术分类

接触式测量设备通过探针与物体表面接触获取形体的轮廓信息，优点是设备成本低，测量精度高；缺点是测量形状复杂的形体时，往往存在探针接触不到的区域（盲区），所得测量数据不完整。非接触式测量方法中的激光扫描速度快，精度高，而且技术较为成熟，因此在逆向工程领域得到了广泛应用。破坏式测量方法，如层析法，它是通过逐层扫描被测物体的断面来获取各层轮廓信息，扫描精度高，但目前应用很少，市场上专用设备较少。

1.2.1　接触式测量方法

接触式三维测量方法主要是三坐标测量仪，原用于工业机械测量中，后逐渐独立出来成为专门的一种测量技术，常用的数据采集方式有触发式和连续式两种。

触发式数据采集：采样头的探针每次接触模型表面，就采集一个轮廓的数据，然后再横向移动一个间距，采集相邻的轮廓数据，最后构筑整个表面的线框模型。触发式数据采集的速度较低（每秒一点至几点）。早期的三维坐标测量仪大都是这一类，其精度可达 0.5 μm。

连续式数据采集：采样头的探针沿着模型表面以某一切向速度移动后就产生对应各坐标偏移量的电流或电压信号并转换成对应点的坐标值，也被称为高速扫描机数据采集系统。

机械接触式测量技术已非常成熟，但这类方法要求必须与实物接触，因而不适合柔软物体的测量，且测量头不能触及的表面无法测量，因此可测量范围受到测量头形状和被测物形状的限制；另外，它的扫描数字化速度受到机械限制，

速度较慢，且需补偿测量头直径，从而影响了测量效率。测量仪的机械结构复杂，对工作环境要求很高，必须防震、防尘及恒温等，使其应用范围受到一些限制。尽管世界各国生产厂家试图用各种高新技术来改变这一现状，至今都未能从根本上解决测量原理本身所造成的结构庞大和复杂的不足，难以满足高效率、高精度测量的需求。

1.2.2 非接触式测量方法

非接触式测量方法种类繁多，主要有立体摄影法、激光扫描法、光学传感器法、结构光照法（如莫尔云纹法）等。由于精度等原因，超声波测量方法主要用于无损探伤领域。

（1）立体摄影法

立体摄影法是根据人体双目视觉的原理，从两个不同的角度同步摄取被测物，然后使用二维平面照片进行三维重构。使用摄像机获取三维物体二维图像的过程，就是将实际空间坐标系中的三维物体施以透视变换，映射到摄像机像平面坐标系的过程。通过多个摄像机从不同方向拍摄的2幅或2幅以上的二维图像，可以按照一定的算法反求出物体的三维曲面轮廓。上世纪90年代初期，立体摄影法开始用于面部软组织的三维测量，并得到较为广泛的应用。这种方法比较适合大尺寸实体，如颌面外形的三维测量。

（2）激光扫描法

激光扫描法根据光源特点和性质又可分为以下几种。

1）点式激光扫描器（点光源）　单束激光打在测试件表面，由摄像头摄取其反射光点。试件表面每个点的 X、Y 坐标由试件图像每一像素的位置确定，Z 坐标值则根据三角学原理算出。

2）线状激光扫描器（条带光源）　单束光源方法每次仅能处理一点，因而速度较慢。为了加快速度可使用条带状光源，利用三角学原理同时处理多个点，从而使测量速度大大加快。

3）区域式激光扫描器（面光源）　区域式激光扫描可以同时获取被测物某个表面区域的测量数据。对于表面形状复杂的被测物体，往往需要从多个角度进行扫描，之后再对所得数据进行拼接。由于不同角度扫描对应的参考坐标系不同，必须将各角度扫描到的数据进行必要的坐标转换，转化到同一坐标系下，该过程称为数据缝合或配准。数据配准的实质是把不同局部坐标系下的数据进行坐标变换，其关键是找出局部坐标系之间的变换矩阵。目前广泛采用的方法是在被测物体上设立标识点（即靶点），在拼接不同方位的扫描数据时，令靶点对应的扫描点重合，就可以将不同坐标系下的数据统一到同一坐标系下。数据配准过程中不可避免地会引入一定的误差。

（3）结构光照法（莫尔云纹法）

两组相互重叠的栅线，在光的干涉下将产生明暗相间的条纹，称为云纹或莫尔云纹。这一现象很早就被发现，但将其作为一种测量方法应用于物体形态、轮廓和位移的量测，只有几十年的历史。1945年Tollenaar第一次从几何学上解析了云纹现象，奠定了云纹测量计算中几何法的基础；1948年发表了第一篇云纹法测量变形体位移的论文。1954年Dan－tu提出“云纹条纹代表等位移线”的学说，奠定了云纹测量计算中位移场法的基础。

所谓结构光就是具有一定特性的光源，主要有单条光栅和密栅两种形式。单条结构光的测量原理与线状激光扫描方法相同，只是光源不同。密栅云纹法是近年来的研究热点之一，它包括面外云纹法和投影栅相位法。面外云纹法是将密栅结构光投射到被测物表面，由于物体高度信息的调制而使栅线发生畸变，畸变的栅线与基准栅线干涉得到云纹图，即被测物表面的等高线，对此云纹图进行处理就可获得高度信息。换言之，面外云纹的基本原理是：光→基准光栅→物体表面→形成变形光栅→变形光栅与基准光栅间产生干涉条纹，即反映物体表面凸凹信息的云纹等高线→摄影、摄像，获取云纹图，供测量分析。与面外云纹法不同，投影栅相位法不进行光学干涉，而是直接利用被调制栅线的相位畸变信息得到物体的三维信息，它采用数学方法解调相位。这样就避免了提取云纹中心线、确定云纹级数等过程，而且可以自动判别物体的凸凹性，因此图象处理宜于实现自动化、具有较高的精度和灵敏度，但在处理复杂形状的物体涉及对云纹或光干涉条纹的处理极为复杂。

（4）CT和MRI法

CT包括医用CT与工业CT，是一种通过计算机处理X射线扫描结果，重构物体截面图像的成像技术。CT最早出现于上世纪70年代，首先应用于医学诊断，后来推广应用于工业领域，是无损检测领域的重要技术手段之一。当X射线束环绕某一部位作断层扫描，通常是横断扫描时，部分X射线（光子）被吸收，X射线强度因而衰减。未被吸收的X射线穿透人体后，被探测器所接收。探测器接收的大量信息经模数（A/D）转换器将模拟量转换成数字量输入计算机，计算机计算出该断层面上各单位体积的X射线吸收值（CT值），并排列成数字矩阵，再经数模转换器（D/A）用黑白不同的灰度等级在荧屏上显示，就获得该层面的解剖结构图像。如果将人体（或物体）某一部位连续的CT图像进行计算机叠加处理，便可重构该部位的三维立体结构，能够更加直观地反映所研究对象的内部构造和整体图像。

CT技术的主要优点是可以在不破坏被测试物的情况下准确地测量出其内外表面、内部特征、空隙和裂缝，如果用来测量人体器官或组织，则可以区分不同密度的组织，而这是其他检测方法难以做到的。理论上CT的精度可高几微米，能够与三维坐标测量仪的测量精度相媲美，且对被测试物的复杂程度没有限制，不存在由于被测试物表面过于复杂而使反射光变形造成测量数据失真或无法测量的情况。CT技术的适用性好，对构成被测试物的材料一般没有限制。但CT技术也存在缺点，对于较小的被测试物及观察细小的孔、隙结构，由于精度不够，尚不能满足研究者的要求；另一方面，在测量人体器官组织时，由于X射线本身对人体有一定的危害而不能采用过于密集的扫描方式，目前能够采用的最小扫描间隔通常为0.5 mm，大大限制其精度水平。此外，CT扫描的费用很高，使其应用受到一定限制。

1.2.3 层析法

层析法是一种破坏式测量方式。它通过铣、磨等方法获取被测物一系列的断面轮廓，并利用光电转换装置采集断面的二维图像信息，最后对所得二维图像进行三维重构，获得被测物的三维数字模型。

层析三维测量由于采用材料去除与光扫描相结合的方法，综合了机械接触测量和光学测量的优点，能够快速、自动、准确地测量被测物体的三维数据，可以测量物体内腔的几何形状。层析法所得扫描数据均为层片数据，为后续处理，尤其是最终用于快速成形加工提供了很大方便。层析法的缺点是获取实物数字模型的过程中将对实物本身造成破坏，此时对被测物所采用的材料也有一定限制。

（1）层析法测量系统

层析法测量的工作流程为：首先把被测物体用封装材料充满其内外腔，做成测量模块；然后对该测量模块进行机械加工，用铣刀或者其他刀具加工出一层层的截面来，再用CCD或者扫描仪对每层截面拍照，得到零件的截层数据；对截层图片处理后，用三维重构软件重构出被测物体的三维模型，如图6.3-3所示。

层析设备主要由五部分组成：主控计算机、运动系统、切削刀具、扫描机构和排屑机构，如图6.3-4a所示。在每一



层的切削扫描过程中，计算机向运动系统发出指令，运动系统带动工作台上升一层的距离；接着运动系统带动切削刀具加工一层，同时排屑系统把加工出来的碎屑吸走，以便扫描仪可以扫描出清晰的断层；然后扫描仪扫描新加工出来的断面；最后切削刀具和扫描仪回到初始位置。如此周而复始，即可完成物体全部层析数据的采集。图 6.3-4b 为层析设备外形图。

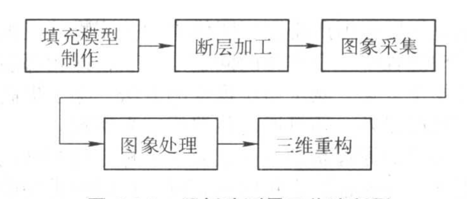
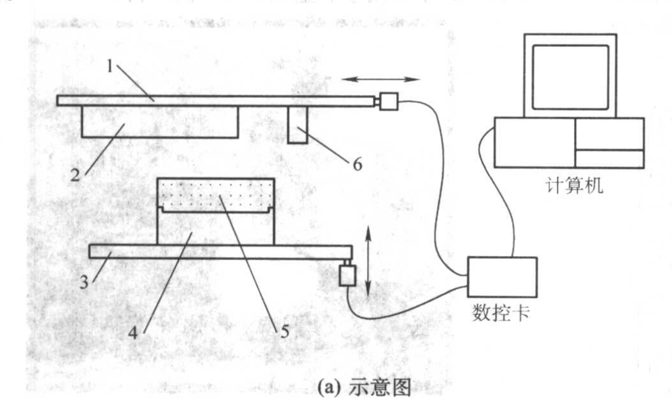
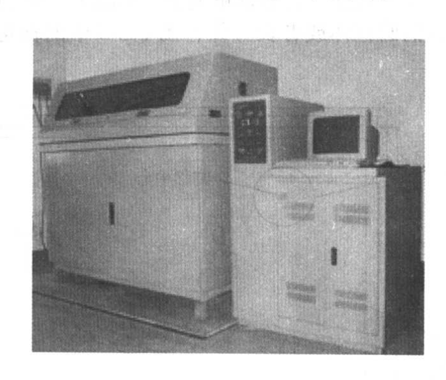


图 6.3-3　层析法测量工作流程图



(a) 示意图



(b) 设备照片

图 6.3-4　层析法测量设备示意图及层析设备照片（北京殷华公司供稿）
1—水平运动平台；2—扫描机构；3—垂直升降台；4—填充模具；5—树脂和零件；6—切削刀具

由于工艺等方面的原因，层析图像中常存在斑点、边缘毛躁、渗透效应、碎屑残留、崩裂、刀纹等缺陷，如果直接进行重构，所得模型质量将无法保证，容易出现空洞、表面粗糙、层间错位引起的台阶效应、毛刺等问题，因此必须对层析图像进行处理。

层析图像中通常包括两种色调：封装材料的背景色调和被测物所体现的目标色调。如图 6.3-5 中左图所示的牙颌石膏模型的层析图像，包括白色和灰色两种颜色，对图像的直方图（如图 6.3-5 右图）进行分析，可以看出：①直方图具有明显的双峰；②双峰的波峰和波谷在某个固定的灰度范围。根据上述特点，可以对图像进行分额。

具有双峰的图像可以用最小错误分割法进行分割，这种阈值分割方法的思想是用迭代的方法找到一个阈值，使按照这个阈值划分目标和背景的错误分割概率为最小。另一种分割方法就是固定阈值分割，即对所有图片都取某个固定的阈值，把图像二值化。

直接二值化的图片具有不少毛刺和斑点，如图 6.3-6 所示，在牙颌轮廓的周围存在着很多斑点，且其面积通常只有几个到十几个像素。

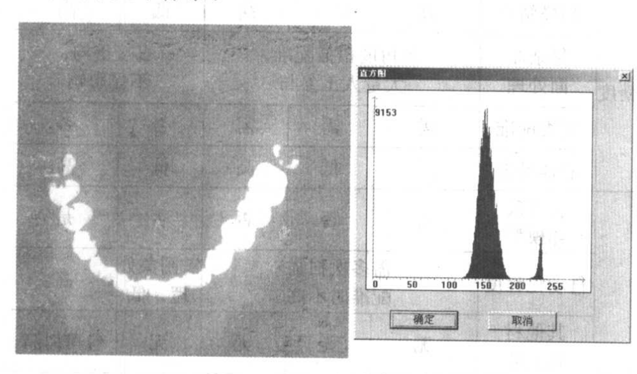


图 6.3-5　牙颌的层析图像及其直方图

为了得到清晰单一的轮廓曲线，对原始图片采取以下步骤处理：

1）中值滤波；
2）平滑；

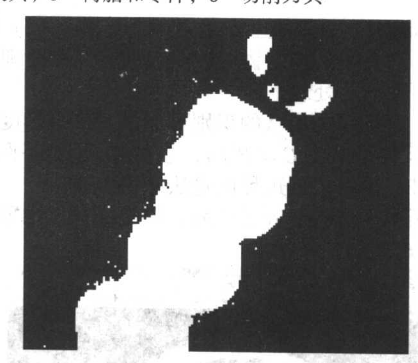


图 6.3-6　具有斑点噪音的牙颌图像

3）阈值二值化；
4）轮廓提取；
5）小阈值面积消去。

其中，中值滤波是一种非线性滤波，主要作用是消除孤立点和线段的干扰，同时保持边界轮廓信息；平滑处理主要是为了消除噪声，可以对图片进行平均平滑和高斯平滑；阈值二值化是根据某个固定阈值，把灰度图像转化为黑白二值图像，为轮廓提取做准备；轮廓提取后，噪音斑点的轮廓曲线也被提取出来，形成一个个互不相交的环形，噪声斑点轮廓和牙颌轮廓的不同点在于：牙颌轮廓包围的面积较大，而噪声斑点轮廓包围的面积往往只有十几个像素的大小，因此计算出每个环形的面积，去掉那些小于某个阈值的环形，即可得到清晰的牙颌轮廓了如图 6.3-7 所示。

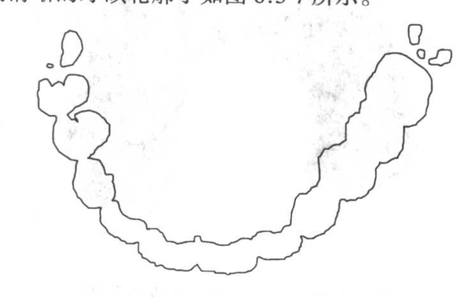


图 6.3-7　牙颌的轮廓曲线

（2）层析法三维重构



三维重构即根据所得层析图像重构被测物的三维数字模型。在重构过程中一个常见的问题是错层，即相邻层的相对水平位置发生变化。减少错层现象的方法，除了提高层析设备的定位精度以外，还可通过位置标定来实现。

位置标定的原理是把一个或若干个标定物与被测物填埋在树指里面，并保证标定物的垂直度。这样在重构中只要对齐标定物，即可保证各图像能够对齐。标定物一般选用颜色与树指不同的圆柱体或者长方体，图 6.3-8 中的标定物为圆柱体。

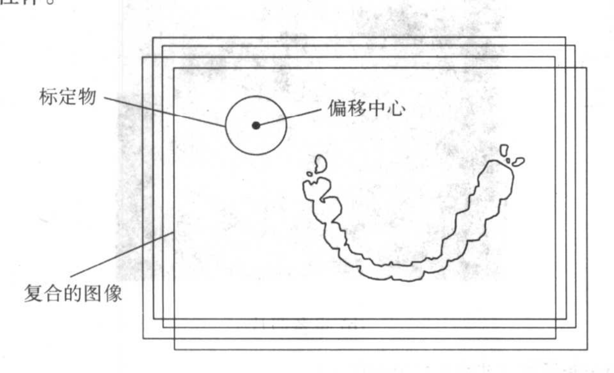


图 6.3-8　位置标定的原理图

位置标定法的步骤是：(1) 填埋标定物；(2) 层析得到层析图像；(3) 识别标定物，对图像进行偏移处理，对齐标定物；(4) 图像后处理。

其中，对标定物形状的识别可通过识别矩形度和圆形度实现，圆形度指标是 $C = P^2/A$，也就是周长的平方与面积的比；此外，也可根据边界能量法来识别。

对层析图像进行对齐处理后，即可进行三维重构，如图 6.3-9 和图 6.3-10。

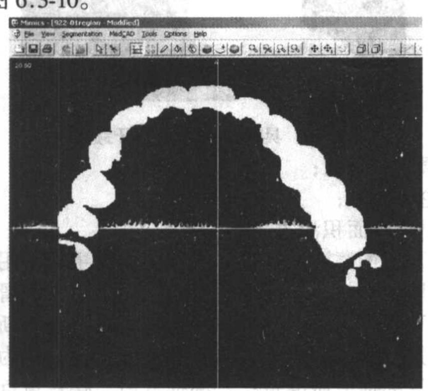


图 6.3-9　Mimics 牙颌三维重构

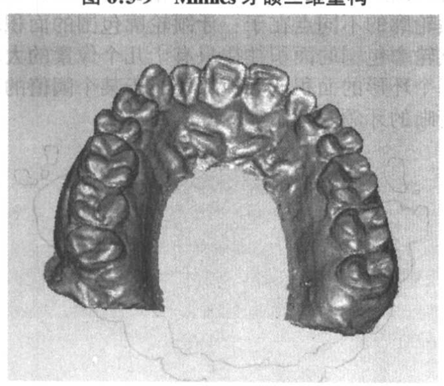


图 6.3-10　牙颌模型的三维造型图

(3) 国内外层析设备

国外的研究公司主要有美国 CGI 公司，它成立于 1994 年，最早开发出了先进的三维层析测量设备。CGI 公司设备主要有三种型号：CSS－300 系统、CSS－1000 系统、CSS－3000 系统，图 6.3-11 为 CGI 公司层析设备的外形图及内部构造结构。国内的研究单位主要有清华大学和西安交大。西安交大的设备结构形式类似于美国 CGI 公司，它们都是立铣方式，而清华大学的层析设备是卧铣形式，与已有的层析机床有所区别，主要用于非金属结构件的层析。

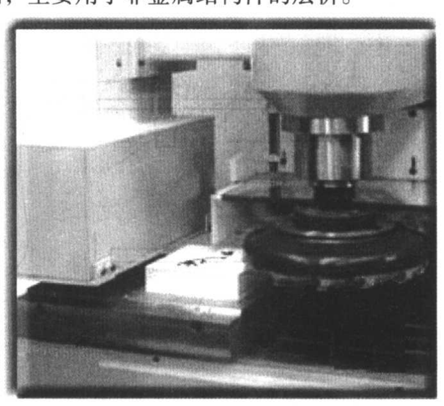


图 6.3-11　CGI 公司层析设备立铣结构照片

1.2.4　各种三维测量方法的比较

综合上述分析，各种三维测量方法如表 6.3-1 所示。

表 6.3-1　各种反求数据测量方法的综合对比

比较项目 \ 测量方法		三坐标测量	结构光照	激光扫描	CT/MRI	层析法
属性		机械接触	光学非接触式		电磁	非接触破坏
原始数据信息		点云	点云	点云	层片图像	层片图像
效率	模型前处理时间	无	配准标记，数分钟		无	数小时
	每模型扫描次数	一次	多次	多次	一次	一次
	一次扫描模型个数	一个	一个	一个	一个	多个
	扫描数据后处理	需配准，较复杂			无需配准	
	总体效率	低	小量较高 大量降低	小量较高 大量降低	低	小量较低 大量较高
精度	扫描精度	高	中等	高	低	高
	复杂曲面处理	多角度扫描配准，大量人工参与			直接重构，不受影响	
	需否配准	需	需	需	否	否
	总体精度	高	低	高	低	高
其他	是否破坏模型	否	否	否	否	是
	自动化程度	需多次扫描配准时不高			需图象处理，低	高
	其他材料消耗	无	无	无	无	包覆树脂
	被测物材料要求	接触不变形	漫反射性好		透射性好	可加工不透明
	内腔数据获取	不能	不能	不能	能	能
	成本	高	低	中等	高	中等

2 STL 文件格式

STL 文件格式是 SLA 设备生产厂家美国 3D Systems 提出的一种用于 CAD 模型与 RP 设备之间数据转换的文件格式，现在已为几乎所有的 RP 设备制造商及相关的 CAD 系统所接受，成为 RP 技术领域中事实上的“准”工业标准。

STL 文件在整个 RP 数据处理中的地位如图 6.3-12 所示。

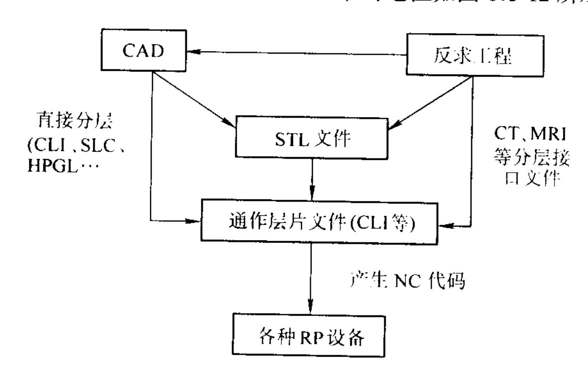


图 6.3-12 RP 中的数据处理

由图 6.3-12 可知，有三条途径可获得通用层片文件，即：从 CAD 模型直接分层（见图 6.3-12 中的左路）；对于 STL 文件进行分层（图 6.3-12 中的中路）；反求工程的 CT、MRI 等分层接口文件（见图 6.3-12 中的右路）。目前最常用的还是中路，即 STL 文件分层后得到 CLI（common layer interface，它是欧洲共同体 BRITE－EURAM 快速成形技术项目提出并完善的一种通用层片文件接口）或 SLI 文件，实际上是零件的二维轮廓的描述文件。由此可见 STL 文件之重要性。有了层片文件（CLI）后，很容易转换为 NC 代码。

STL 文件的定义如图 6.3-13 所示，每一个三角形面片用三个顶点表示。每个顶点由其坐标（x，y，z）表示，由于必须指明材料包含在面片的那一边，所以每个三角形面片还必须有一个法向量，用（L_x，L_y，L_z）表示。对于多个三角形相交于一点的情况，由于与此点有关的每个三角形面片都要记录该点，则此点被重复记录多次，造成数据的冗余。从整体上看，STL 文件是由多个这样的三角形面片无序地排列集合在一起组成的，其二进制格式定义如下：

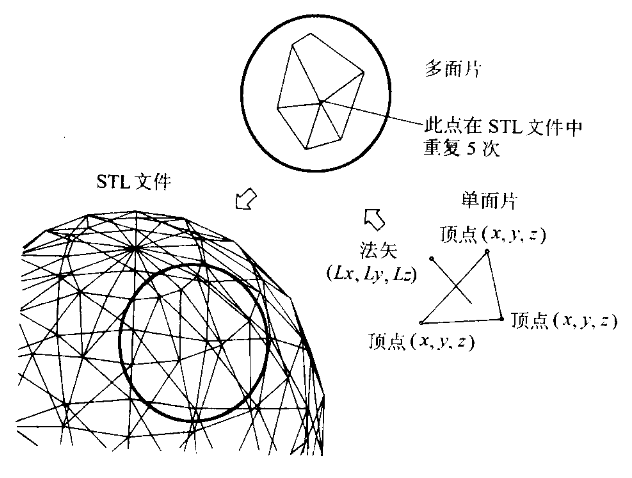


图 6.3-13 STL 文件定义

<STL 文件>∷=<三角形面片 1><三角形面片 2>…<三角形面片 n>

<三角形面片 i>∷=<法向量><顶点 1><顶点 2><顶点 3>

<法向量>∷=<L_x><L_y><L_z>

<顶 点>∷=<x><y><z>

一般情况下，三角形面片的个数与该模型的近似程度密切相关。三角形面片数量越多，近似程度越好，精度越高。三角形面片数量越少，则近似程度越差。用同一 CAD 模型生成两个不同的 STL 文件，精度高者可能要包含多达 10 万个三角形面片，文件达数兆，而精度低者可能只用几百个三角形面片，面片多少对后续处理的时间和难度影响很大。

STL 文件有两种格式，即 ASCII 格式和二进制格式。ASCII 格式如图 6.3-14 所示。图中第一行为说明行，记录 STL 文件的文件名，从第二行开始记录三角形面片，首先记录三角形面片的法向量，然后记录环，依次给出三个顶点的坐标，三个顶点的顺序与该三角形面片法向量符合“右手法则”。这样一个三角形面片的信息记录完毕，开始记录下一个三角形面片，直到将整个模型的全部三角形面片记录完毕。

```
SOLID TEST.STL
FACET NORMAL  1.000000 0.000000 0.000000
OUTER LOOP
VERTEX 140.502634 233.993075  -38.310362
VERTEX 140.502634 229.424780  -38.359042
VERTEX 140.502634 242.525774  -27.097848
ENDLOOP
ENDFACET
FACET NORMAL-0.903689 0.004563  -0.428166
OUTERLOOP
VERTEX 134.521310 273.427873 30.242009
VERTEX 134.521310 308.505852 30.715799
VERTEX 140.502634 334.576026 18.369396
ENDLOOP
ENDFACET
FACET NORMAL  -0.903689 0.004563  -0.428166
OUTER LOOP\;
VERTEX 140.502634 334.576026 18.369396
VERTEX 140.502534 294.929752 17.946926\;
VERTEX 134.521310 273.427873 30.342009\;
ENDLOOP
ENDFACET
ENDSOLID TEST1.STL
```

图 6.3-14 STL 文件的 ASCII 格式

STL 文件的二进制格式是按字节读取的。其存储方式为：前 80 个字节做说明用，其后四个字节存放三角形面片的总数（整型数），空两个字节，开始记录三角形面片信息（法向量和三个顶点），法向量分量和坐标值采用浮点数，每个数值占据 4 个字节，在每个三角形面片信息记录完毕后，空两个字节，然后循环记录三角形面片信息，直至文件结束。由于采用二进制格式表达 STL 文件，其数据量比用 ASCII 格式的数据量要小的多，所以目前绝大多数 STL 文件都采用二进制格式。

图 6.3-15 为用 STL 文件表示的球体和北京北海白塔。

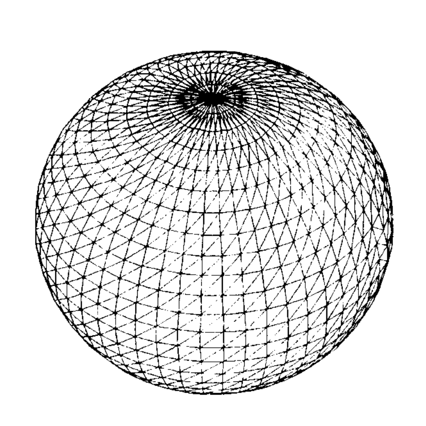
STL 文件自产生以来，就成为 RP 领域的“准”工业标准，除了 SLA 设备在 RP 市场占有很大份额外，与其自身的优点也有很大关系，STL 文件格式的优点主要有。

1）数据格式简单，处理方便，与具体的 CAD 系统无关。

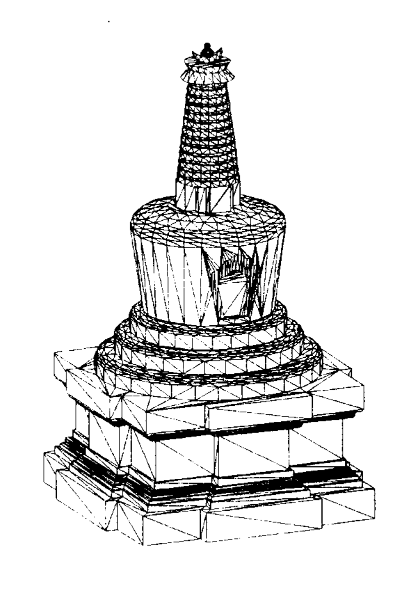
2）对原 CAD 模型的近似度高。理论上只要三角形的数目足够多，STL 文件就可以满足任意精度要求。

3）为几乎所有 RP 设备所接受，已成为大家默认的 RP 数据转换标准。





(a) 球模型



(b) 北京北海白塔

图 6.3-15　用 STL 文件表示的三维实体（清华大学激光快速成形中心提供）

STL 文件的缺点也是显而易见的：

1）数据冗余量大；

2）文件数据量大，特别是当近似程度较高时；

3）易产生裂缝、空洞、悬面、重叠面和交叉面等错误；

4）不含拓扑信息。

针对 STL 文件的缺点，国外一些大学和公司设计出其它一些文件格式，以取代 STL，如以色列 Cubital 公司开发了 CFL（cubital facet list）文件格式，新加坡南洋理工大学的 Gan G.k. Jacob 等提出了 LMI（layer manufacturing interface）文件格式等。但由于这些格式多数没有得到当前 CAD 造型系统和逆向软件的支持，无法在快速原型技术中普及应用。

2.1　STL 文件的正确性

STL 的优点在于存储数据简单，处理方便，但存储数据简单往往导致信息不充足，容易产生错误。一个正确的 STL 文件应该保证每个内部三角形只与而且必须与三个共边的三角形相连，三角形之间只允许在公共顶点和公共边处相交，如图 6.3-16 所示。

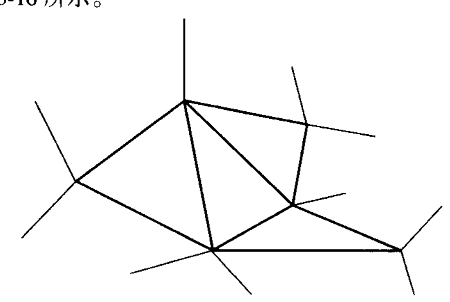


图 6.3-16　正确的 STL 文件

但在生成 STL 文件时，由于模型本身错误或转换算法的缺陷，导致模型的某些部分违反上述规则，产生错误。CAD 实体模型造型系统中经常采用构造实体几何（CSG）模型，通过一些简单形体（体素）的组合来表示复杂的形体，但如果未进行求交运算，则可能造成一个物体延伸到另一个物体，导致生成的 STL 文件含有错误。另外实体模型在转换前必须为正则形体，不能有多余或不足的点、边、面等，以保证该模型转换生成的 STL 文件不出现歧义。如果 CAD 模型为表面模型，由于它由多个曲面片（patchs）组成，往往会因为小曲面片的丢失而造成空洞，在转换成 STL 文件时也会产生错误。

根据 STL 文件错误的特点，可将其分为以下几类（见图 6.3-17）：

1）法向错误（见图 6.3-17a）　某一面片法向与周围面片法向相反，造成歧义。此类错误属于中小错误，不修正对工艺影响也不大。如果修正也很简单，根据右手法则重新更正其法向即可。

2）某三角形面片的一个顶点落在另一个三角形面片的边上（见图 6.3-17b）　根据 STL 文件的点对点原则，每个三角形面片应该与其相邻的三角形面片共同拥有一条边，也就是说每一对相邻的三角形面片应该共用两个顶点。这意味着每一条边应属于并且只属于两个三角形面片。b）错误违反了点对点原则，但这种错误比较轻微，对分层处理不会造成影响，只是增加计算量。其处理也比较简单，将 PB 去掉，使 PB 两边的三角形面片合并成为一个三角形面片即可；或者是增加一条边 PA，使 PA 所在三角形面片分为两个小三角形面片，考虑到这样会增加计算量，常采用去除一条边的方法。

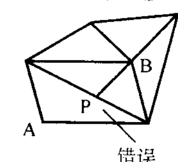
3）模型出现裂缝或空洞（见图 6.3-17c）　这种错误经常出现在对表面模型进行表面三角化处理得到的 STL 文件上。由于表面模型是由多个曲面片拼接而成，面片之间往往有裂缝，生成的 STL 文件也会出现裂缝。如果拼接模型的某些小的曲面片丢失，则造成大的空洞，这是违反 STL 点对点原则的另一种情况。对于 STL 文件来讲这是比较严重的错误，在成形过程中会造成扫描填充不必要的地方（图 6.3-18），影响成形件表面质量，因而必须在分层之前修复。修复的方法是增加一个或几个三角形面片将裂缝或空洞补上。

4）同法向面片重叠（见图 6.3-17d）　同法向面片重叠也是经常出现的一种错误，由实体模型或表面模型转换的 STL 文件都可能出现这种错误。其特点是两个或多个三角形面片完全重合并且法向相同。造成的后果是分层后出现重迭的扫描线，因而造成歧义现象。这种情况也较易处理，去掉多余的面片即可。

5）反法向面片重叠（见图 6.3-17e）　另一种面片重叠方式为两面重叠，法向相反，结果两面所围成的体的体积为 0。这种情况经常出现在实体造型中利用 CSG 方式构造实体但并未作求交运算，结果将连在一体的零件分为两部分，对

零件内部质量等方面产生很大影响（见图 6.3-19）。修正的方法是将两个相对的面片均去掉。

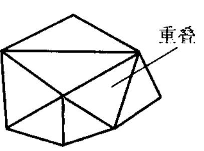
(a) 法向错误（根据“右手原则”修正）



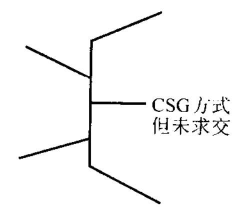
(b) 某三角形面片的一个顶点落在另一个三角形的边上（去掉一边或增加一边均可）

裂缝

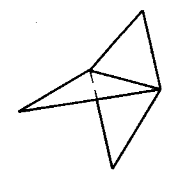
(c) 某些三角形面片丢失导致出现裂缝（增加一个或几个面片）



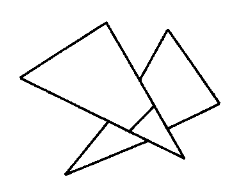
(d) 出现重叠的面片（去除一个面片）



(e) 无意义的零体积的面（两面片重叠法向相反，结果两面片所围体积为 0，两个相对的面片均应去除

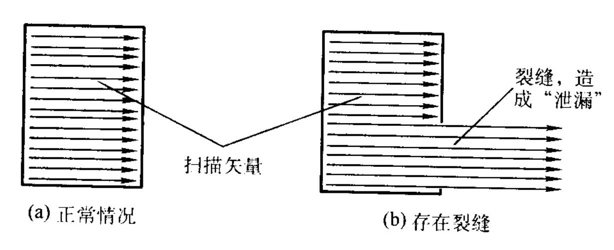


(f) 非正则情况，一边共三面片（根据共边的面片是否奇偶数决定如何处理）



(g) 不正确的相交，（分解，重新安排三角形面片）

图 6.3-17　STL 文件的错误类型

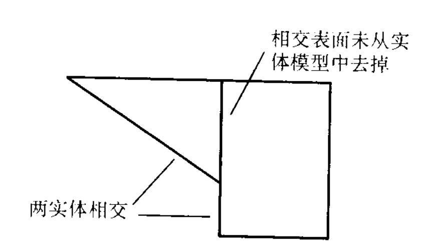


(a) 正常情况　(b) 存在裂缝

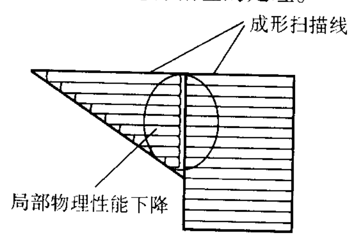
图 6.3-18　裂缝和空洞问题

6）非正则情况（见图 6.3-17f）　一边由三个面片或更多的面片共有，则出现非正则形体。如果有偶数个面片共一边，则可能是存在悬面，也可以是几个不同形体在此边产生接触。如果共此边的面片数为奇数，则形体中肯定包含悬面。因此要根据不同情况分别处理，如果是悬面要删除掉。

7）不正确的相交和自相交（见图 6.3-17g）　不同面片在空间内相交是不正确的相交，肯定造成歧义，是较严重的错误，为了处理这种错误必须首先将相交的三角形面片进一步分割（见图 6.3-20），然后再判断它属于前面六种错误类型的那一类并进行相应的处理。

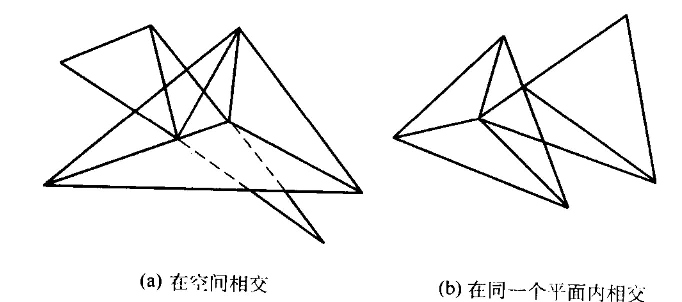


(a) 反法向重叠将零件分为两个部分



(b) 修正后零件成为一个整体

图 6.3-19　反法向面片重叠的问题



(a) 在空间相交　(b) 在同一个平面内相交

图 6.3-20　相交的两个三角形面片分割后成为 8 个三角形面片

上面简要分析了七种不同的错误类型，错误产生的原因和相应的处理方法。在这些错误中最常见的问题是裂缝和空洞（见图 6.3-17c），其次是非正则悬面和重叠的面（见图 6.3-17f、图 6.3-17d、图 6.3-17e），自相交（见图 6.3-17g）经分割后可以归并为上两种情况，图 6.3-17a 所示的法向错误和图 6.3-17b 所示的错误对快速原型工艺一般不会产生较大影响。

RP 工艺对 STL 文件的正确性和合理性有较高的要求，主要是要保证 STL 文件无裂缝、空洞、无悬面、重叠面和交叉面，以免造成分层后出现不封闭的环和歧义现象。根据错误严重程度可分为三类。

1）严重错误　零件无法成形，这类错误包括文件无法读取，文件有明显的空洞和裂缝，零件不同部分是否相交不明确等。

2）中等错误　零件可以成形，但操作者必须清楚何处有错误和错误的性质，并调整加工参数，必要时修补一些错误。

3）小错误　零件可按预定参数正常成形。

不同的 RP 工艺对 STL 文件错误的容忍程度不同，例如

FDM工艺由于它的丝材熔化喷出后的直径大于0.2 mm，并且其填充线扫描方式与其他工艺不同，不是栅格扫描方式，因此不检查以下缺陷。

1）顶点原则　面片顶点不能位于其邻接面片的边上，这是小错误，对分层无大的影响。

2）正八分原则（positive octant rule）　顶点可位于空间内任何位置，可出现负的顶点坐标值。这与工作台初始位置的设定有关，只要零件大小不超出加工体积即可。

3）二进制STL文件头文件中的面片数不需要验证。

4）很小的裂缝不认为是缺陷，裂缝小于或等于0.2 mm会自动闭合，此误差最大可达0.76 mm。这与丝材喷出的直径有关。

5）忽略面片法向，可用顶点顺序确定面片法向，按右手原则确定。

相比之下，SL工艺和LOM工艺由于采用激光，并且填充线扫描方式为栅格线方式，对STL文件正确性要求就严格得多。

若CAD造型系统是实体造型系统，则生成的STL文件错误比较少，一般为法向错误（图6.3-17a）和反法向面片重叠错误（图6.3-17e）；若CAD造型系统是曲面造型系统，由于表面模型的曲面相接处容易产生裂缝（图6.3-17c）和重叠（图6.3-17d），因此在生成STL文件时出现错误。问题比较严重的是由逆向工程方法得到的表面模型生成的STL文件，这种表面模型的可靠性要差一些，产生的STL文件往往出现较严重的裂缝、空洞和重叠现象。根据以上分析和实际使用经验，可以总结出STL文件的四类基本错误：

1）法向量错误　属于中小错误。

2）面片边不相连　有多种情况。

① 大的裂缝或空洞——不相连的边，开口的多义线。又分为两种情况，一种是空洞位于分层面内，需通过工艺参数的特殊选择弥补此缺陷；另一种情况是空洞不在分层平面内，则分层得到的多义线是不封闭的，要修补。

② 非正则——从实体突出的悬面，算作中等缺陷，可照常分层和产生加工路径。

③ 不相接的面片，需人工判断并修正。

3）相交或自相交的体或面　底或面重叠，造成分层多义线重叠，如图6.3-21所示。

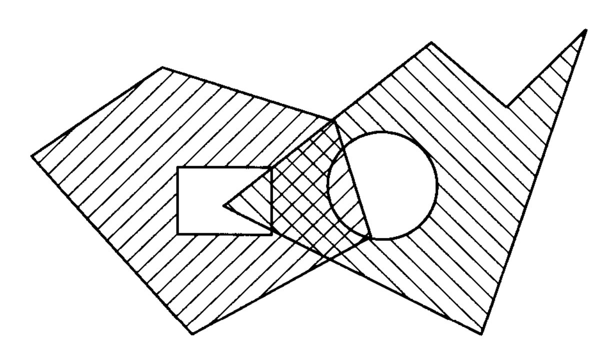


图6.3-21　造成歧义的重叠

4）文件不完全或损坏

① 面片丢失。

② 不相连的面片。

③ 不同面片大小差别过大。

④ 用DOS/Unix newline转换器产生二进制STL文件。

STL文件出现错误的原因很多，由于在很多情况下，RP设备接到的往往是已经转换好的STL文件而不是原始的CAD模型，因此需要一种工具能直接检验STL文件的正确性并修补不正确的STL文件。

2.2　STL文件拓扑信息的建立

拓扑信息主要描述各几何实体间的邻接关系和连接关系。对STL文件来讲，一个三角形面片是由三个边围成的，每条边是以两个顶点来定义的。每一个三角形应该与另外三个共边的三角形相连接，从任何一条边可以知道它的两个项点以及共此边的两个三角形。顶点的连接信息应包括共此点的所有边和所有三角形面片，这些信息都是STL文件的拓扑信息。目前的STL文件中是不包含这些拓扑信息的，因而STL文件的正确性检验和修复等工作无法进行，所以要先从STL文件无序的三角形中重建拓扑信息。

拓扑信息的建立除了用于STL文件检验和修复，还具有以下优点：

1）压缩了STL文件数据冗余信息。

2）基于STL文件的自动支撑添加。

3）快速优化分层算法。

除此之外，拓扑信息在信息处理其他方面也起着重要作用。系统地考虑信息处理各阶段的要求，建立一个高效的数据结构来表达拓扑信息是十分重要的内容。

2.3　STL文件错误修正

2.3.1　法向错误及其修正

某一面片法向与周围法向相反，造成歧义。因为法向是从实体内部向外，若相邻面片法向矛盾，则分不清该处表面为内表面还是外表面，在分层时，因为分层轮廓的走向与三角形面片的法向有关，这势必会造成分层轮廓不封闭，因此这类错误必须修正。首先根据已建立的拓扑关系，分析相邻三角形的法向是否矛盾，再根据STL文件三角形的右手法则，重新调整法向错误的三角形的顶点顺序，即可修正这类错误，如图6.3-22所示。

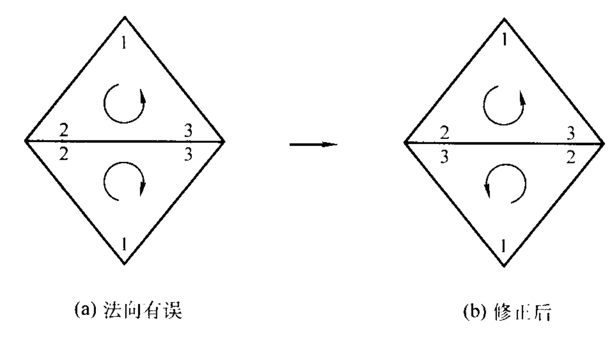


图6.3-22　法向错误及修正

2.3.2　裂缝及其修补

由于三角形面片丢失而造成的STL文件模型的裂缝和空洞对RP工艺来讲是比较严重的错误，因此是重点研究的对象。利用重建的STL文件拓扑信息可以辨别出裂缝和空洞的特点（图6.3-23）。

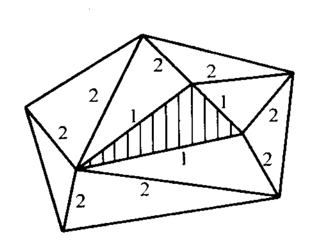
图6.3-23中每一条边上的数字是共有此边的面数（用FacetNum表示）。可以发现，构成裂缝的所有边其FacetNum为1，称这种边为单面边，表示此边只与一个面片相连，并且这些边构成一个闭合的环。

由于每条单面边的方向是可以根据此边两端点的先后次序确定的，因而由单面边所构成的闭合环也是有方向的，这个方向对修补时确定所增加三角形的法向很有帮助。根据单面边所构成环的特点，可以将裂缝或空洞分为以下两种情况分别处理：

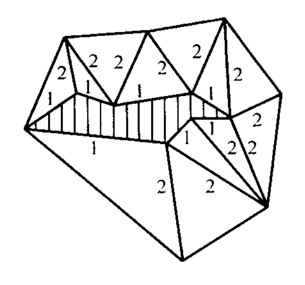
（1）三角形情况（图6.3-23a）

这是最简单的一种情况，可做如下处理。





(a) 三角形裂缝



(b) 多边形裂缝

图 6.3-23 STL 文件中的裂缝

1）判断裂缝是否为三条单面边构成的闭合环（三角形）。

2）如是，判断三角形的三个顶点是否在同一直线上，如不是则转到 4）。

3）找出位于其它两点之间的点并删除与此点相连的边，将此边所连接的两个面合并为一个大的三角形面片，并修改相应边表和点表中的拓扑关系，结束。

4）增加一个三角形，此三角形以三个单面边为其边界。在面表中增加一项，并修改相应边表和点表中的拓扑关系，结束。

（2）多边形情况（图 6.3-23b）

1）从多边形任意一点出发，选择通过此点的两条边计算其夹角，如果此角为最小，则以此两边为基本边，并连接两边的另外两个端点构成第三条边形成一个三角形。

2）依次取顶点并计算此点两边夹角，找出具有最小夹角的点。

以通过此点的两边为基本边构成三角形修补裂缝，若余下的裂缝仍为多边形，回到步骤 1）。

3）修补后余下的裂缝为三角形，按情况 1 处理。

4）结束。

以上对两种不同情况下的裂缝和空洞情况作了分析，对于目前 STL 文件中遇到的大多数情况都已能较好地处理。但对于较大的空洞完全利用软件自动地修补是不可能的，更好的方法是采用人机交互的方式来完成这种修补。

2.3.3 重叠及其处理

如果 STL 文件中有重叠面存在，例如三角形对三角形的完全重叠，则这些重叠面片处边的 FacetNum 数为 3，并且所有 FacetNum 为 3 的边构成一个闭合的环。如图 6.3-24 所示。

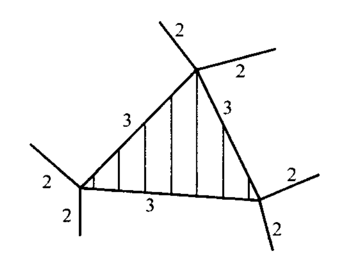


图 6.3-24 STL 文件中的三角形重叠

重叠处理算法如下。

1）判断 FacetNum 为 3 的边是否构成一个闭合环。

2）如是，从任一边开始取出共此边的三个三角形，并判断各三角形的第三个顶点是否相同，可找出两个重叠的三角形。

3）删除一个重叠的三角形，改变相应的拓扑关系，结束。

当出现多个三角形重叠的清况时，即 FacetNum = 4，5 …，处理方法类似。

2.3.4 悬面的处理

由实体模型生成的 STL 文件可能出现悬面。悬面不像裂缝和重叠那样对快速成形加工造成很大影响，FDM 工艺中不把悬面作为错误，而是相应生成一个单壁厚的加工路径，这对零件内部质量影响不大，但可能在零件表面造成毛边，影响零件外部质量。

同样可以根据边的 FacetNum 判定是否存在悬面，如图 6.3-25 所示。

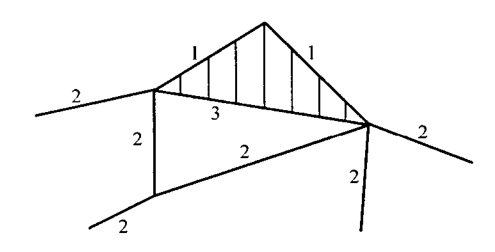


图 6.3-25 STL 文件中的悬面

可以看出，悬面区域是由 FacetNum 为 1 和 FacetNum 为 3 的边所围成的。处理算法如下。

1）判断由 FacetNum 为 1 和 FacetNum 为 3 的构成区域。

2）从 FacetNum 为 1 的边开始取出一三角形删除，改变相关的拓扑关系，返回 1）。

3）已不存在满足 1 的区域，则结束。

3 成形方向优化

3.1 基本概念

快速成形是一种分层叠加、堆积成形技术，成形时由底层向上逐层堆积而成形。对一个有确定形状和结构成形件来说，可以选择不同的成形方向，如一个手机壳，可以将其竖直起来，则成形方向为手机壳的长轴方向，分层方向则垂直此长轴方向；也可将其长轴置于与水平平面成 45°的方向而成形；显然，也可以将手机壳的长轴置于与水平面平行的状态而成形，则成形面积最大（分层面积最大）而层数最少。这三种成形方向对成形件的质量、成形速度和支撑结构的自动生成均产生很大的影响。

不同的造型方向所需要的支撑数量往往有很大的差别。为了节省支撑材料，减少后处理工作量，如手工去除支撑的任务，人们常常选择所需支撑最少的那个造型方向。为了提高主要表面的质量，常将手机壳竖直起来成形。可见，零件的造型方向影响到它的表面质量、加工时间以及不同方向的强度。起初，造型方向是由设计者或者加工者通过手工进行选择。他们研究零件的特征，根据需要选择某一个造型方向，然后在 CAD 造型软件或者 STL 文件的数据处理软件中对零件进行旋转。后来，人们意识到自动选择造型方向的必要性，并研究了一些全自动或者半自动的判断最佳造型方向的方法。

图 6.3-26 是清华大学激光快速成形中心和北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司开发的软件提供给用户选择最佳造型方向的界面图。在该算法中，综合考虑了决定造型方向的三个因素：台阶现象、支撑接触面积和加工时间。用户可以指定这三个因素的优先顺序，并为每个因素指定一个容差值，即在该容差值范围内可以忽略该因素对造型方向的影响。寻找最佳造型方向的过程如下：

1）提取 STL 模型中所有面积大于某一定值的平面，用这些平面的外法向量方向作为候选造型方向。

2）对每个候选方向，将 STL 模型旋转到相应位置（使候选方向与 $-Z$ 向一致），并计算 STL 模型在该造型方向下

的台阶效应、支撑接触面积和 Z 向高度。

3）根据用户指定的优先顺序和容差值，挑选出所有符合条件的候选方向，供用户选择。

第一步中候选平面的提取与待支撑面的提取类似。软件自动选用 STL 模型长方体包围盒的六个面中最小面积的 1% 来作为默认的最小平面面积值（area filter）。如果用户需要将所有面片的外法向量都作为候选方向进行计算，可以将该值设为 0。

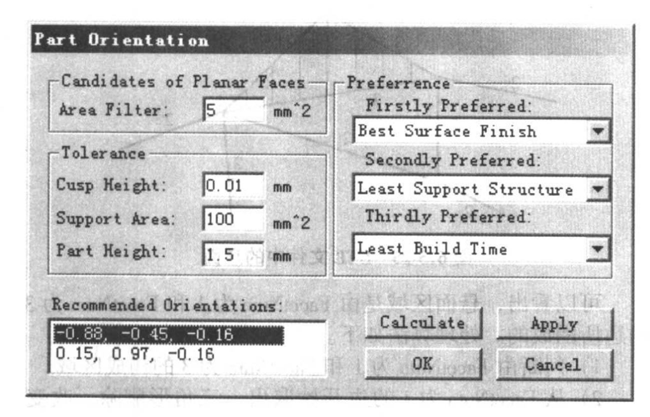


图 6.3-26　计算最佳造型方向的用户界面

3.2　成形方向决定因素的量化计算

对三个决定造型方向的因素：台阶现象、支撑接触面积和加工时间进行量化计算。在对曲面或者倾斜面进行分层的过程中，会导致台阶效应的产生。台阶效应是产生精度误差的主要原因。在图 6.3-27 中，阴影部分为分层产生的台阶现象，线段 BD 的长度称为“尖头高度”。采用平均尖头高度作为衡量台阶现象的量化指标。

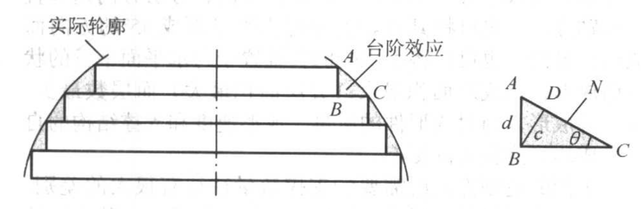


图 6.3-27　台阶效应及其计算

图中 d 为分层厚度，θ 为三角面片外法向量 N 与 z 轴的夹角。尖头高度 c 为

$$c=\begin{cases} d\cos\theta & (\theta\neq 0) \\ 0 & (\theta=0) \end{cases} \tag{6.3-1}$$

对所有面片，平均尖头高度为

$$c=\frac{\sum A_i c_i}{\sum A_i}=\frac{\sum\limits_{\theta_i\neq 0} A_i d_i\cos\theta_i}{\sum A_i} \tag{6.3-2}$$

式中，A_i 为第 i 个面片的表面积。若以恒定层厚 d 进行分层，则平均尖头高度的计算式可写成

$$c=\frac{\sum A_i c_i}{\sum A_i}=\frac{\sum\limits_{\theta_i\neq 0} A_i d_i\cos\theta_i}{\sum A_i} \tag{6.3-3}$$

上式即为计算平均尖头高度的公式。

支撑接触面积 s 为所有待支撑面片的 xy 投影面积之和。设 θ_m 为最大支撑角，则支撑接触面积 s 为

$$s=\sum_{\left|\theta_i-\frac{3}{2}\pi\right|\leqslant\theta_m} A_i\cos\theta_i \tag{6.3-4}$$

每个单层的加工时间可以分为预备时间 t_w 和扫描时间 t_s 两部分。每层的预备时间都是相同的，而扫描时间与具体的层片轮廓有关。设模型的 z 向高度为 H，分层厚度为 d，层数为 n，扫描速度为 v_s，扫描间距为 h_s，第 i 层的截面面积为 s_i，那么总的加工时间的计算公式为

$$t=t_w\frac{H}{d}+\sum_{i=1}^{n}\frac{s_i}{h_s v_s} \tag{6.3-5}$$

设 V 是模型的体积，忽略分层带来的体积误差，有

$$V=\sum_{i=1}^{n}s_i d \tag{6.3-6}$$

于是加工时间 t 的计算公式可以写成

$$t=t_w\frac{H}{d}+\frac{1}{h_s v_s d}V \tag{6.3-7}$$

可见在扫描速度、扫描间距和分层厚度一定时，加工时间随着模型高度的增加而增加。因此，在考虑造型方向对加工时间的影响时，可以用模型高度 H 作为衡量加工时间 t 的指标。

通过上述平均尖头高度 c、支撑接触面积 s 和加工时间 t 的计算，可以得到决定造型方向的三个因素的量化表达式。通过比较不同造型方向下的这三个值，可以选择出满足用户要求的最佳造型方向。

3.3　最佳成形方向的选择

通过提取 STL 模型中的所有面积大于某一定值的平面，得到候选造型方向的集合。对每个候选造型方向，将模型旋转到相应位置，然后计算其三个量化指标：平均尖头高度、支撑接触面积和造型高度。用 CPartOrientation 类来描叙造型方向，每个造型方向包含其方向矢量以及三个量化指标。其数据结构如下所示：

```
CPartOrientation
{
    VECTOR      m_Vector;          //造型方向矢量
    double      m_dCuspHeight;     //平均尖头高度
    double      m_dSupportArea;    //支撑接触面积
    double      m_dPartHeight;     //模型高度
};
```

设共提取出 n 个候选造型方向，其集合为 $S=\{O_1, O_2, \ldots, O_n\}$，用户指定的三个决定因素的容差值分别为 ε_c、ε_s 和 ε_h。下面以“台阶效应→支撑接触面积→加工时间”的优先顺序为例，来说明符合要求的最佳造型方向的筛选过程。

首先找出集合 S 中所有元素的 m_dCuspHeight 的最小值 c_{min}，然后从 S 中筛选出所有 m_dCuspHeight 不超过 $c_{min}+\varepsilon_c$ 的元素，组成集合 S_1，即

$$S_1=\{O\mid O\in S,\ O.\mathrm{m_dCuspHeight}\leqslant c_{min}+\varepsilon_c\}$$

然后找出集合 S_1 中所有元素的 m_dSupportArea 的最小值 s_{min}，同上，从 S_1 中筛选出所有 m_dSupportArea 不超过 $s_{min}+\varepsilon_s$ 的元素，组成集合 S_2，即

$$S_2=\{O\mid O\in S_1,\ O.\mathrm{m_dSupportArea}\leqslant s_{min}+\varepsilon_s\}$$

最后，找出集合 S_2 中所有元素的 m-dPartHeight 的最小值 h_{min}，再从 S_2 中筛选出所有 m_dPartHeight 不超过 $h_{min}+\varepsilon_h$ 的元素，组成集合 S_3，即

$$S_3=\{O\mid O\in S_2,\ O.\mathrm{m_dPartHeight}\leqslant h_{min}+\varepsilon_h\}$$

集合 S_3 中的元素，即为满足用户要求的所有造型方向。用户可以挑选其中的某一方向作为最终的最佳造型方向。

3.4　成形方向自动选择的实例分析

下面以手机外壳的 STL 模型为例，给出使用本算法进行

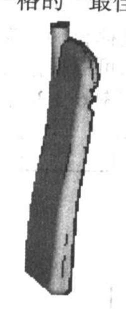
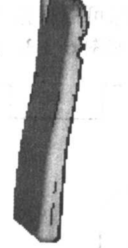


最佳造型方向选择的结果。

将所有三个容差值都设为 0，分别以最小台阶误差、最小支撑接触面积和最短加工时间作为第一选择因素，计算出相应的最佳造型方向。由于容差值都为 0，这样得到的造型方向是满足相应条件的严格的“最佳”造型方向。

图 6.3-28 是手机壳在不同选择条件下的最佳造型方向。计算过程中使用的其他相关参数为：最小平面面积 $f=5.0\ \mathrm{mm}^2$，分层厚度 $d=0.1\ \mathrm{mm}$，最大支撑角 $\theta=30°$。

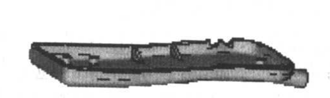
具体计算数据见表 6.3-2。

(a) 最小台阶误差



(b) 最小支撑接触面积



(c) 最短加工时间

图 6.3-28　最佳造型方向的自动选择实例

表 6.3-2　不同造型方向下的量化指标

选择因素	造型方向矢量	平均尖头高度 c/mm	支撑接触面积 s/mm^2	模型高度 h/mm
最小台阶误差	(−1，0，0)	0.0131	620	117.69
最小支撑接触面积	(0.71,0,0.71)	0.0569	150	86.17
最短加工时间	(0，0，1)	0.0708	4658	11.79

4　支撑添加

RP 技术都是逐层制造原型/零件，所有的 RP 工艺在成形过程中都需要支撑——无论是专门添加的，还是自然产生的。有些工艺在成形加工时需要通过软件添加支撑结构，比如 SL 和 FDM（MEM）工艺。另外一些工艺在成形过程中不需要另外添加支撑，而是用自身材料作为支撑，如分层实体制造（SSM）工艺中切碎的纸、3DP 中未喷黏结剂的粉末。对于 SL 和 MEM 等工艺，如果不能通过软件添加支撑，只能制造一些简单模型，根本发挥不了 RP 技术的特点。因此，对支撑结构的研究设计非常必要。

不同工艺对支撑的要求大同小异。例如 MEM 工艺是通过丝材的层层堆积成形原型，每一层都是在先成形的一层上堆积而成，先前一层对当前层起到定位和支撑的作用。随着高度的增加，层片轮廓的面积和形状都会发生变化，当形状发生较大的变化时，上层轮廓就不能给当前层提供充分的定位和支撑作用，这就需要设计一些辅助结构，对后续层提供定位和支撑，以保证成形过程的顺利实现。MEM 工艺采用材料堆积方式成形，同一点处材料不能堆积两次，支撑可以采用圆形、隔层十字交叉或 Z 字状等形式。一般对于原型本体，通常采用轮廓扫描加 x 或 y 方向单向 Z 字状填充或隔层 x、y 单向交叉 Z 字状填充的方式，支撑采用 45°（角度可选）的单线扫描。MEM 系统如果使用两个或多个喷头，就可以用不同的材料分别成形零件和支撑，或在支撑与成形件接触的地方，采用易于去除的材料，如水溶性材料，都可以使得支撑更容易和成形件分离，对原型表面质量造成的影响也可减小。

4.1　影响支撑结构质量的因素

1）支撑的强度和稳定性　支撑是为原型提供支撑和定位的辅助结构，良好的支撑必须保证足够的强度和稳定性，使得自身和它上面的原型不会变形或偏移，真正起到对原型的支撑作用。如果支撑强度不足，例如薄壁形或点状的支撑，由于其截面积很小，自身很容易发生变形，就不可能真正起到支撑的作用，影响原型的精度和质量。

2）支撑的加工时间　在满足支撑作用的情况下，要求加工时间越短越好，即支撑机构应尽可能小，同时还可以节约成形材料。

3）支撑的可去除性　支撑是为顺利成形而附加在原型上的部分，当原型制造完毕，需将支撑与本体分开。原型与支撑粘结过牢，不但不易去除，而且会降低原型的表面质量，甚至在去除时破坏原型。支撑与原型之间结合的部分越少，越容易去除，同时结合部的黏结在能保证足够支撑强度的情况下，应尽可能低。这样支撑的去除更容易，对本体精度和表面质量的影响最小。现在 MEM 工艺可以采用水溶性材料成形支撑，造型完毕后，将原型置于水中，支撑就可以自行溶化，非常容易去除。

4.2　支撑结构添加方式

添加支撑总的来说有两种方式：即在 CAD 系统中手工添加支撑与软件自动生成支撑结构，表 6.3-3 为几种支撑添加方式的比较。

表 6.3-3　几种支撑添加方式比较

添加方式	输入	输出	优点	缺点
CAD	人机交互	STL 文件	1）可以设计任意形状的支撑 2）比较直观	1）支撑可能不足或过多 2）支撑尺寸位置不易确定 3）完全由人设计，比较乏味 4）对 MEM 等工艺不太适合
基于 STL 文件	STL 文件	STL 文件	1）自动生成支撑 2）支撑量及尺寸、位置精确 3）可自动选择支撑类型	1）需要人机交互以确定参数 2）须对 STL 文件进行处理
基于层片文件	层片文件（CLI）	层片文件（CLI）	1）自动生成支撑 2）支撑量及尺寸、位置精确 3）算法简单	1）支撑类型固定 2）支撑冗余量大

4.2.1　CAD模型中添加

在CAD中手工设计支撑，首先进行原型/零件设计，然后再用CAD软件系统提供的造型功能进行支撑结构设计，如图6.3-29所示。手工添加支撑的前提是用户对成形工艺很熟悉，要根据不同的形体选取不同的支撑结构和参数。

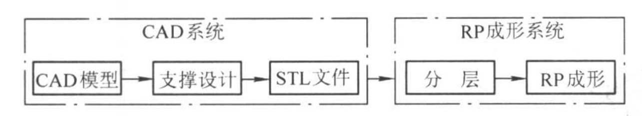


图6.3-29　CAD中进行支撑结构设计

手工添加支撑方式有显而易见的缺点。

1）支撑添加质量难以保证　若设计不细致，则可能会出现该加支撑的地方没有加，而不该加支撑的地方却加了支撑的情况，这会导致成形失败或增加去除支撑的工作量；

2）工艺规划时间长　由于是在CAD系统内设计支撑，没有相应功能模块，使支撑的添加成为一件繁琐费时的工作。

3）不灵活　添加好的支撑参数一旦需要修改，需要重新添加全部的支撑。

4.2.2　软件自动添加

在STL模型中添加支撑基本是根据一些支撑设计参数如支撑面角度、最大非支撑面面积和最大非支撑悬臂长度来提取支撑面，生成支撑体，与原型进行干涉计算而生成的。从层片模型生成支撑则是比较相邻层片间的形状差异，进行布尔（BOOL）运算，设计支撑结构。

由于层片文件已经丢失了原型的部分三维信息，支撑的参数不易控制，质量不高。从STL模型添加支撑可以充分利用原型的整体信息，但对于复杂的曲面形体，支撑面的边缘轮廓的形状可能相当不规则，直接生成支撑的STL模型需要三维集合运算，处理难度大大增加。对于一些细小结构，不能完全从STL模型进行支撑设计，必须兼顾层片形状。STL模型结合CLI层片模型是获得良好支撑的最佳方式。

4.3　FDM（MEM）工艺支撑

FDM（MEM）工艺通过送丝机构将丝材送入喷头，在喷头内熔融后经喷嘴喷出。堆积出一层实体后，工作平台下降一个层厚，然后再成形下一层。

4.3.1　支撑的方式

（1）整体支撑

整体支撑是一种基于层片模型的支撑方式，生成规则如下：在一个工艺边框内成形零件，零件内部区域采用本体的路径扫描方式，而本体以外和工艺边框之内的区域采用支撑的路径扫描形式，如图6.3-30所示。

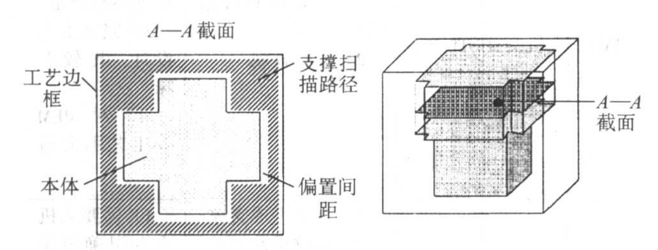


图6.3-30　整体支撑

这种支撑的优点是简单通用，适用于任何复杂形体，稳定性非常好。这种支撑的缺点是支撑的数量较多，其中包含一些不必要的支撑，浪费了支撑材料，影响成形速度，降低原型表面质量。所以这种支撑并不是理想的支撑形式。

（2）局部支撑

添加局部支撑是指只将支撑添加在那些向下且满足一定条件的表面下：

1）表面与水平面的交角小于一定值；

2）表面的面积大于一定值；

3）表面的当量半径（面积/周长）大于一定值。

局部支撑具有节省支撑材料、支撑去除容易、零件表面精度高的特点。局部支撑可以根据表面形状和大小灵活地选择支撑结构。局部支撑如图6.3-31所示。

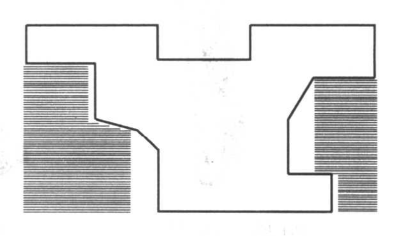


图6.3-31　局部支撑

生成局部支撑的基本步骤如下：

1）根据支撑添加的条件，将STL模型中需要添加支撑的相邻三角面片连成若干个支撑表面；

2）将每个支撑表面向基础面投影，并与STL模型进行几何布尔运算，生成支撑的STL模型；

3）对支撑的STL模型进行分层；

4）对分层轮廓线进行规划，生成支撑扫描路径。

4.3.2　结合STL和层片模型的局部支撑添加算法

当零件原型比较复杂时，直接从支撑面投影得到的支撑会与原型相交（干涉），要对原型和支撑进行3维的BOOL运算。这种运算比较复杂，实现起来比较困难，效率也比较低。同时，为使支撑与本体分开，两者之间应留有一定的间隙，从三维模型进行这些处理非常困难。本文结合三维STL和层片模型设计支撑，使支撑和原型的三维布尔运算简化为一维图形布尔运算，计算难度大大降低。该算法流程如图6.3-32所示。

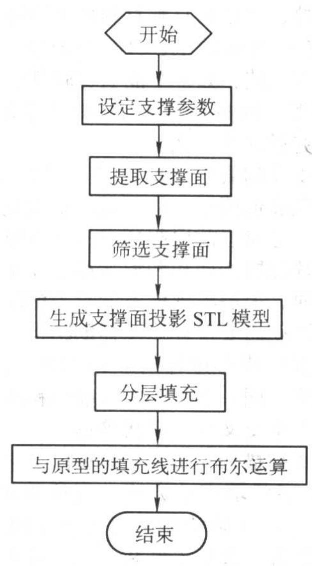


图6.3-32　结合STL和层片模型的支撑设计算法

（1）支撑面提取

确定需要添加支撑的表面区域是非常重要的一步。首先根据STL模型三角面片的外法矢方向和与负 Z 向的夹角进行分析，如图6.3-33所示，那些外法矢向下，且与负 Z 向夹角小于给定值（如50°）的面片被认为是有可能要添加支撑的面片。然后将这些面片按照拓扑关系连接成几个分别连续的区域，再根据区域面积和面积周长比进行筛选。



收集出的每一个支撑区域都是“候选”的，因为这些区域只满足面片法矢条件，还要通过区域面积和周长等其他条件进行筛选。

（2）筛选支撑面

对于 MEM 工艺，并非每个侯选支撑区域都适合添加支撑，对于某些侯选支撑面，如面积很小或悬臂长度很短的支撑区域，支撑完全没有必要。所以必须在候选支撑面中进行筛选，剔除这些特殊支撑面。

筛选的第一步是对支撑面进行分类。支撑面可以分成悬臂和悬吊两大类，悬臂类可以又分为悬臂边和悬臂面，如图 6.3-34 所示；悬吊类可以分为悬吊点、悬吊边和悬吊面，如图 6.3-35 所示。悬臂边，悬吊点和悬吊边是特殊的支撑区域，生成支撑时必须将其扩展成面。

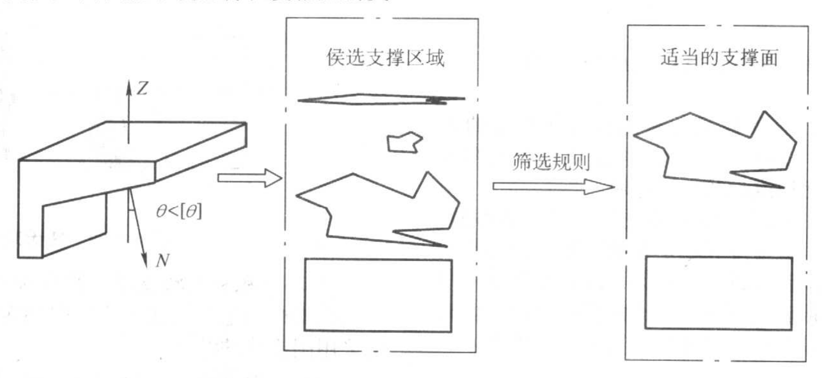
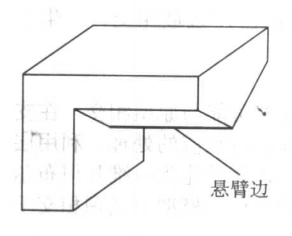


图 6.3-33　候选支撑面筛选



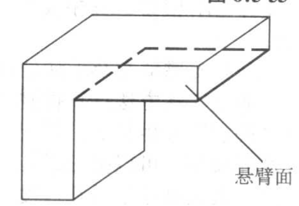
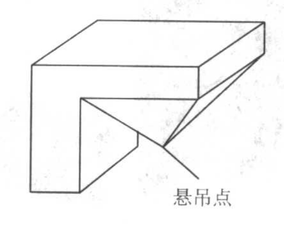
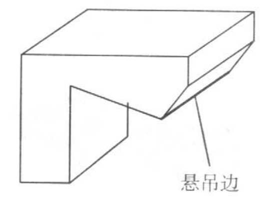


图 6.3-34　悬臂边和悬臂面

悬吊类支撑面必须添加支撑，而悬臂类支撑则要根据其悬臂长度决定是否需要支撑结构。候选支撑面的筛选需计算投影区域总面积 A、投影区域周长 S 及 A/S。由于 STL 模型的自身特点，在所有的侯选支撑区域中，可能出现不少只包含几个小面片的区域。通过限制区域的最小面积，可以过滤掉很多无效的支撑面。如果最小面积的值取得过大，也有可能将一些本来需要的支撑面去掉。这个值可由用户根据 STL 模型的大小灵活调整。对于一般 300 × 300 mm 大小的模型，A 可取值 2.0 ~ 5.0 mm^2。限制 A/S 的最小值是为了去掉一些悬臂长度较小的支撑面。这个值在应用中比较难以确定，在一般情况下，也可以不对 A/S 加以限制，而由用户进行判断。





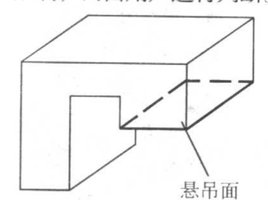


图 6.3-35　悬吊点、悬吊边和悬吊面

图 6.3-36 为一个零件提取并筛选后的支撑面。左边为 STL 模型，右边为提取的支撑面。

（3）生成支撑的 STL 模型

将最终确定的支撑面向基础面投影，并构造支撑 STL 模型。STL 模型由顶面 As，投影面 Prj 和侧面三部分构成，如图 6.3-37 所示。

支撑面由一组三角面片 $\{F_1 \quad F_2 \cdots F_n\}$ 构成，则顶面也为 $\{F_1 \quad F_2 \cdots F_n\}$，投影面由 $\{F_1 \quad F_2 \cdots F_n\}$ 按一定的规则投影到基础面的一组三角形组成，即 $\{F_{p1} \quad F_{p2} \cdots F_{pn}\}$，侧面由每条支撑面内外轮廓边向基础面投影产生的多个四边形组成。每个四边形都可以通过增加对角线形成两个三角形面片。

需要注意的问题是保证支撑 STL 模型所有面片顶点均遵守右手法则。以顶面为例，原来属于本体的三角面片的法矢与对应的支撑的三角面片的法矢方向是刚好相反的，因此支撑的三角面片的顶点顺序与本体对应面片的顶点顺序刚好相反。

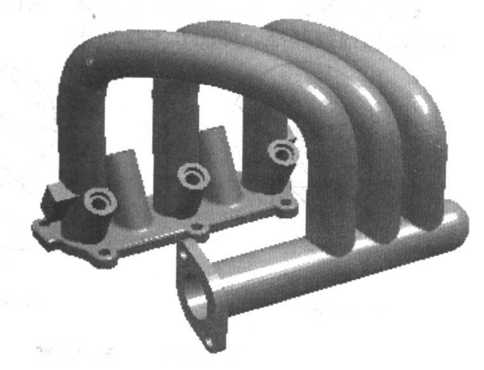
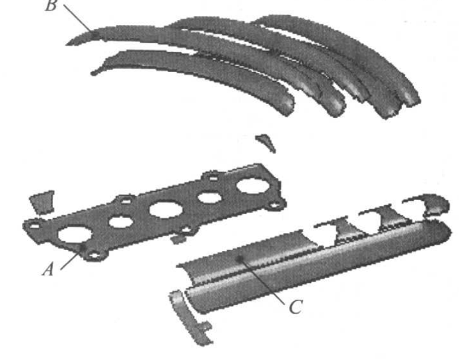



图 6.3-36　提取支撑面

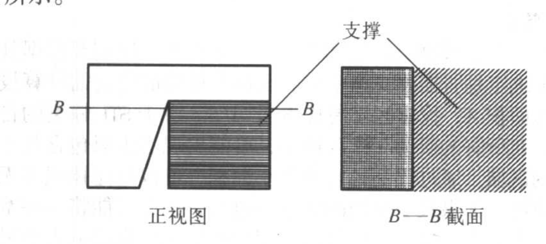


图 6.3-37 将支撑面向基础面的投影生成 STL 支撑

(4) 支撑面的分类

为保证支撑的质量，必须根据支撑面的形状特征的不同，应进行不同的处理。支撑面可分为三类：大面积支撑区域，狭长支撑区域，小面积或点状支撑区域。

1）大面积支撑区域　规则的大面积支撑比较容易添加。由于面积大，支撑不用考虑强度和稳定性的问题，为节省加工时间，其支撑网格的间距可以取得较大，或者在底部采用较大网格，而在与原型接触的顶部用较小的网格间距。填充网格可以使用单向Z字填充或隔层十字交叉填充。如图 6.3-38 所示。

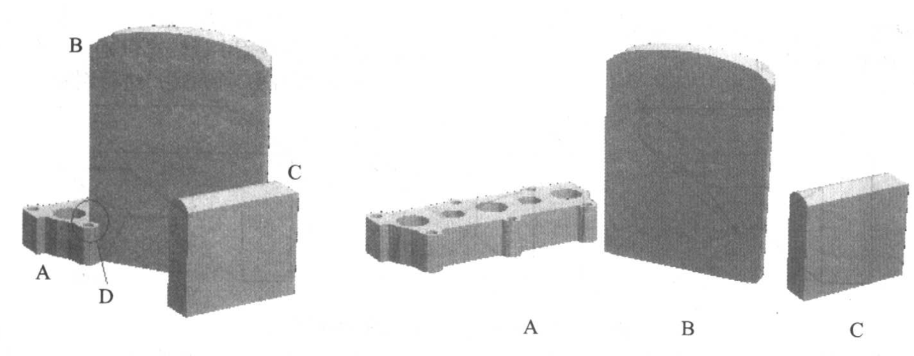


图 6.3-38 大面积支撑

2）狭长支撑区域　对于狭长支撑，主要考虑其强度和稳定性。对于这类支撑，由于截面形状的特点，自身的稳定性不高，容易发生变形。设计支撑应主要从提高稳定性和强度两方面进行，采用楔形支撑以增加强度。支撑过窄可以向外作适当扩展，如图 6.3-39 所示。

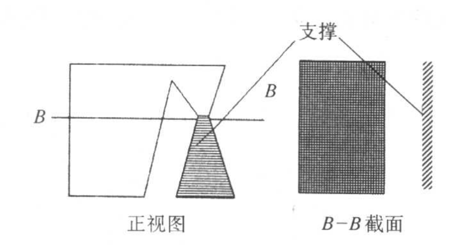


图 6.3-39 狭长支撑

3）小面积和点状支撑　强度和稳定性同样也是小面积和点状支撑的主要问题。为加强稳定性，类似于狭长支撑，可采用圆锥体的结构。

图 6.3-40 为图 6.3-36 中 *A*、*B*、*C* 三个支撑面投影生成的支撑 STL 模型，其中支撑 *A* 和 *B* 在 *D* 区域相交，产生干涉。

(5) 支撑填充及干涉处理

利用上述方法计算得到的支撑有可能与原型相交，在支撑之间也会发生相交的情况，必须进行相应的处理。利用层片填充模型，可以把三维几何布尔运算转化为一维几何布尔运算，大大减小了计算难度。在层片填充模型上处理相交干涉的算法如图 6.3-41 所示。

图 6.3-40 支撑 STL 模型

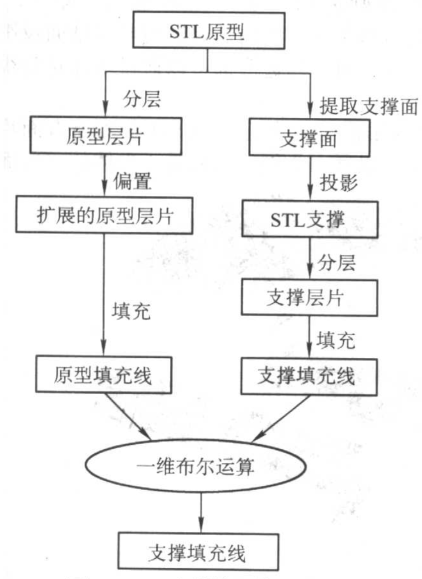


图 6.3-41 支撑的层片干涉处理

其中一维布尔运算是用支撑层片与扩展的原型层片填充求差。对原型层片偏置的目的是让支撑与本体间有一定的距离，有利于支撑的去除，同时还可以提高原型的表面质量。生成填充扫描线时还应注意一个问题，各层对应填充线应位于同一基准，以便于进行集合运算。采用不同的基准，则填充线会发生错位，无法进行布尔运算，为此，应为各层确定相同的扫描线基准，如图 6.3-42 所示。

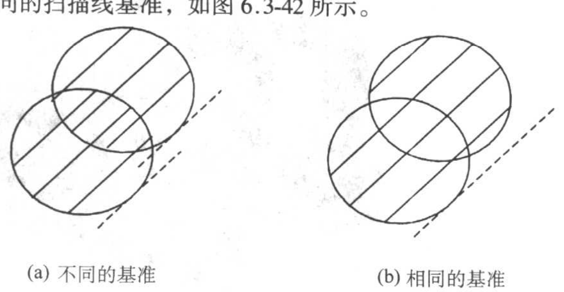


图 6.3-42 填充的基准

1）一维图形的布尔运算　假设 *A* 和 *B* 是两个直线段集



合，每个集合由一系列直线段构成。用二元组 $<Ps, Pe>$ 表示一段直线，Ps 为起点，Pe 为终点，则可将 A 和 B 表示为：

$$A=\{<Ps_i, Pe_i>|i=1, n\}$$

$$B=\{<Ps_i, Pe_i>|i=1, m\}$$

集合 A，B 的布尔运算有三种，即交（&）、并（+）、差（-）。Roth 提出了一维图形的布尔运算算法，分为3个步骤，如图6.3-43所示。

第1步：合并排序。把 A 和 B 中的所有的线段端点合并到一起，并按由左向右的顺序进行排序。这一步可以通过排序算法实现。

第2步：分类。从左向右，每两个相邻的顶点构成了一条线段。把所有的线段分类为保留还是去除。如果一个线段被 A 或 B 的某一线段包含，则标记为 I（in）；否则标记为 O（out）。分类是将各个线段根据对 A 和 B 的标记进行合成，若线段标记为 I，则保留，标记为 O，去除。表6.3-4定义了三种运算的合成规则。

第3步：简化。将第2步的结果中所有线段合并成同一线段，去掉多余的点，使最终结果中每两条线段都不相连。

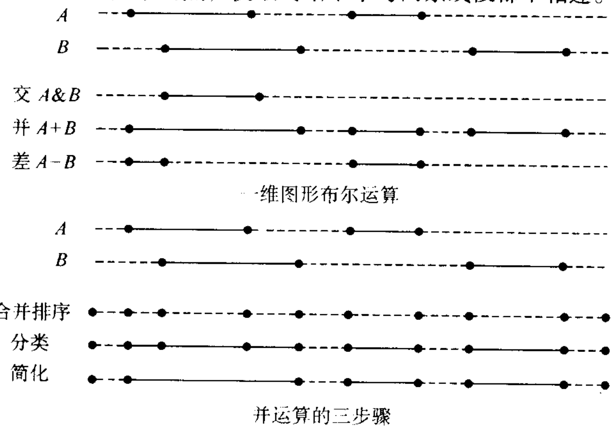


图6.3-43 一维几何元素的集合运算

表6.3-4 一维图形合成运算规则

集合运算	并（A+B）				交（A&B）				差（A-B）			
A	I	I	O	O	I	I	O	O	I	I	O	O
B	I	O	I	O	I	O	I	O	I	O	I	O
合成结果	I	I	I	O	I	O	O	O	O	I	O	O

2）填充线的布尔运算　支撑的作用是为其上面的原型提供充分的定位和支撑作用，每各层片的支撑结构是由上面的层片所决定的，因而设计支撑必须按由上而下的顺序进行。支撑的布尔运算包括两各部分，一是支撑与原型本体的干涉，另一个是当前层支撑和其以上层片支撑的运算。支撑与支撑的运算是为了去除已被原型本体所替代的多余的支撑，减少材料浪费，节约支撑时间。如图6.3-44所示，支撑面 A 的投影区域应为矩形 B 所包围的范围，在第 i 层，A 支撑的右半部分被本体所代替，因而第 i 层以下的支撑结构可以省略冗余的右半部分。这样，既保证了定位和支撑作用，又减少了冗余。

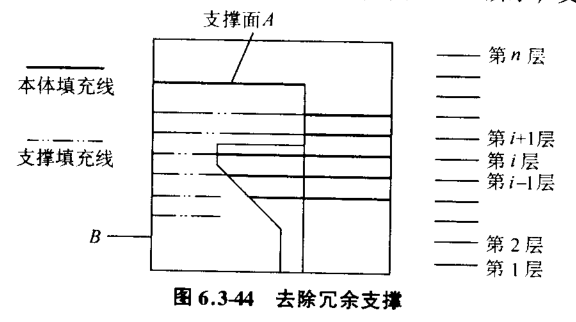


图6.3-44 去除冗余支撑

设第 i 层的本体填充线集合为 Hp_i，支撑STL的填充线（原始支撑填充）集合为 Hos_i，实际支撑填充线集合为 Hs_i，冗余支撑填充线集合为 Hrs_i，则：

$$Hrs_i = Hos_i \& (Hp_i + Hrs_{i+1}) \tag{6.3-8}$$

$$Hs_i = Hos_i - Hrs_i \tag{6.3-9}$$

零件总的分层数为 n，当前层号为 i，则填充线布尔运算的步骤如下：

① 设 $i=n$，$Hrs_{n+1}=\Phi$；

② 计算当前层的本体填充线集合 Hp_i，原始支撑填充线集合 Hos_i；

③ 计算 $Hrs_i = Hos_i \& (Hp_i + Hrs_{i+1})$；

④ 计算 $Hs_i = Hos_i - Hrs_i$；

⑤ 若 $Hs_i=\Phi$，结束；

⑥ 层号 $i=i-1$，返回第2步；

3）支撑的填充方向　支撑的填充主要考虑填充线的方向。对于大面积的支撑面，可以采用45°的单线Z字形形填充或隔层交叉的Z字形填充。填充角度对狭长支撑的影响很大，错误的填充线方向甚至会使之起不到任何支撑作用。如图6.3-45所示。当填充方向与其走向有较大夹角或垂直时，支撑效果最好。

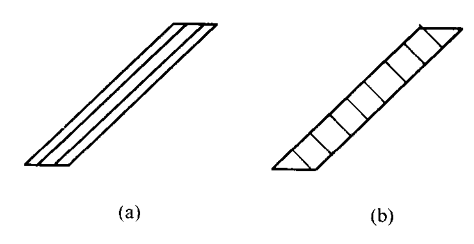


图6.3-45 支撑的填充方向

图6.3-45a的填充由于支撑的填充间距较大，狭长方向上的轮廓就有可能没有获得支撑结构的定位和支撑。图6.3-45b中，不仅轮廓有稳定可靠的支撑，而已支撑的强度和稳定性也比图6.3-45a要高许多。

4.4 SL 工艺支撑

在SLA的造型过程中，有三种情况需要添加支撑（见图6.3-46），以保证造型过程的顺利进行。

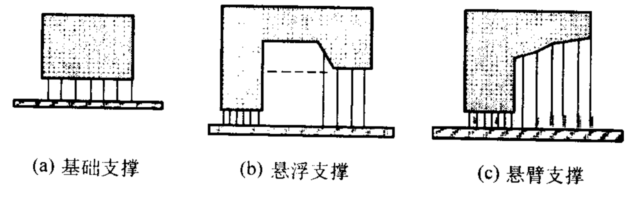


图6.3-46 SLA中的待支撑区域

首先，支撑在SLA加工平台和加工零件之间提供了一个分离区域（见图6.3-46a）。这些位于零件底部的支撑叫“基础支撑”，它把零件从加工平台上提升一定的高度。如果没有基础支撑，零件的最底层会直接黏结在加工平台上，固化的树脂会陷入加工平台的圆孔里。这样就几乎无法完好无损地把加工完毕的零件从加工平台上取下来。此外，基础支撑的存在也避免了加工平台与树脂液面的平行度误差对造型精度的影响。

另一种需要支撑的情况是制造过程中悬浮区域的产生

(见图 6.3-46b)。如果没有支撑把这些悬浮区域固定在加工平台上，刮板的运动就会使它们在液态树脂中产生“漂移”，严重影响零件精度，甚至造成造型过程中零件的“塌陷”。因此，必须添加支撑来固定这些“悬浮”层片。

最后，需要支撑的最常见的情况是当前层超出前一层形成了一定长度的悬臂（见图 6.3-46c）。支撑结构为这些悬臂提供“扶壁”作用，从而防止零件在完全固化前发生翘曲或塌陷。

根据零件几何形状的不同，可以选用不同的支撑类型。常见的支撑类型有如下四种：网状支撑、线状支撑、点状支撑和三角片状支撑，如图 6.3-47 所示。网状支撑一般用于大面积的支撑区域。对于狭长的支撑区域，应采用由通过其中线的纵板和若干横板组成的线状支撑。点状支撑用于非常小的支撑区域，并且要比待支撑区域稍大。而三角片状支撑用于垂直悬臂，可以大大减少支撑体积，提高支撑的可去除性。

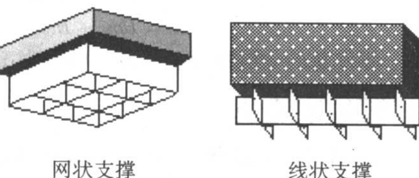
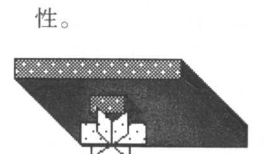
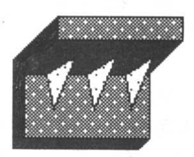




图 6.3-47　SLA 的支撑类型

Kirschman（Clemson University，USA）在其硕士论文中深入研究了 SLA 工艺的支撑结构。他做了大量试验来确定支撑结构设计的指导法则和相关参数，并在试验基础上设计开发了一种相对简单的支撑自动生成算法，用作 CIDES 软件系统的一个子模块。其算法读入 STL 文件，根据面片法矢找出待支撑区域，给悬臂加上 Gusset 支撑，然后在其他地方加上基础支撑。在此算法中边作为基本的几何元素，并根据边所连接的两个面片的几何关系，把边分成四类：臂边、底边、平边、虚边（见图 6.3-48）。将待支撑面片的边排列成连续的轮廓线，然后对轮廓线划分网格，并使用生成的网格线来构造网状支撑。由于该算法只考虑了基础支撑和悬臂梁支撑，且无法处理支撑体和原型相交的情况，在实际应用中有很大的局限性。

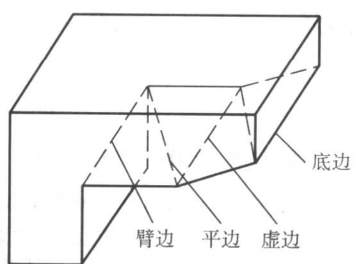


图 6.3-48　Kirschman 对边的分类

Junghoon Hur 和 Kunwoo Lee（Seoul National University，Korea）等开发了一套 RP&M 数据处理软件——RapidWORK98。其中支撑生成算法的基本思路如下：读取零件的 STL 文件，找出水平或者近似水平的三角面片，并将相邻面片加入到“待支撑面表”。然后提取待支撑面的轮廓，根据其几何信息确定支撑类型。然后以一定的间距对待支撑面进行网格划分，利用网格线的交点及其在底面的投影构造网状支撑（见图 6.3-49）。如果在待支撑面中检测到狭长区域，则在该区域改变网格线的布局形成线状支撑。但他们的论文并没有说明如何处理支撑和本体相交的情况，而这正是支撑生成算法的难点所在。此外，如果仅仅利用网格线交点来生成支撑，那么支撑的精度将会较低，无法适用于具有细微特征的零件。他们在结论部分提到该算法生成的支撑带有齿形，但论文中并没有提到生成齿形的具体算法。

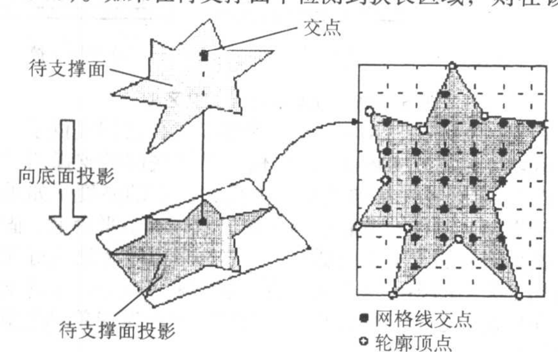


图 6.3-49　Junghoon 的支撑生成算法

Seth Allen 和 Deba Dutta（University of Michigan，USA）提出了一种基于造型过程模拟的支撑生成算法。此算法既可以处理 STL 文件，也可以处理层片文件。他们考虑了三种需要支撑的情况：悬臂、悬浮区域和造型过程中重力造成的不稳定区域。算法首先对零件进行分层，并模拟其造型过程，这样就可以找出造型过程中的悬浮区域和不稳定区域。当这两种情况出现的时候，在该处形成从零件表面投影到底面的支撑薄壁。模拟结束后，找出悬臂并添加适当的支撑。支撑的计算基于一个所谓的“射线结构”，即 $x-y$ 平面上的一系列方格，过每个方格的中心作平行于 z 轴的射线，计算并存储这些射线和零件的交点。该算法只能生成网状支撑，局限性较大。同前一算法类似，支撑精度取决于射线结构的方格尺寸，而方格受到计算量的限制不可能取得很小，因此其支撑精度也不高。此外，由于该算法要模拟造型过程和计算大量直线与三维实体的交点，其支撑计算速度较慢。用该算法计算一个简单的茶杯模型的支撑结构，在 Silicon 图形工作站上就耗费了 8 min。

Eric Johnson 和 Ravi Janardan（University of Minnesota，USA）实现了两种基于空间分解的支撑生成算法（见图 6.3-50）：垂直分解（Vertical Decomposition）和圆柱分解（Cylindrical Decomposition）。通过空间分解将模型以外的空间分割成一系列的垂直棱柱，这些棱柱就构成了所需的支撑结构。同时他们用一个具体的模型说明了复杂度为 $O(n)$ 的零件可能具有复杂度为 $O(n^2)$ 的支撑结构。他们将支撑的添加视为一个纯粹的计算几何的问题，计算出了支撑结构严格的三维实体模型，并没有从工艺的角度对支撑结构进行加工，如筛选支撑面、齿形化、支撑类型多样化等。

清华大学激光快速成形中心的朱君和郭戈等研究开发了一种基于一维运算的支撑生成算法。该算法的特点是：为了避免支撑与原型以及支撑之间的干涉所带来的三维布尔运算，预先对原型和支撑进行了分层填充，得到一维的填充线段，然后对一维线段进行布尔运算，大大降低了计算难度。该算法将三维运算简化为一维运算，计算效率较高，在 FDM 工艺中得到了很好的应用。不过这种算法也有其明显的缺陷。它在对支撑进行裁减之前就将其离散为一维扫描线段，所以无法得到支撑最终的 STL 模型，进而无法对支撑进行相关的编辑和优化。例如，无法实现支撑向原型的插入（这在 SLA 工艺中是必须的）；无法生成齿形支撑，使得支撑的去



除较为困难；只能生成单一的块状支撑，无法实现三角片状支撑、线状支撑等，灵活性较差。

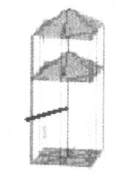
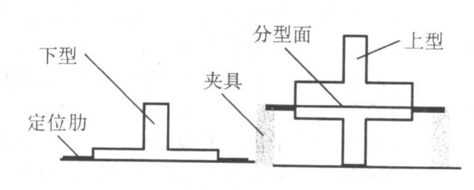




图 6.3-50　基于空间分解的支撑生成算法

支撑的去除往往是一项繁重的后处理任务，并且会对零件的质量造成较大的影响。因此，如何减少甚至消除支撑结构也是 RP 数据处理领域的一个热门研究方向。Sara McMains (University of California，Berkeley，USA) 针对 FDM 工艺提出了一种叫 "Double Sided" 的成形方法，可以大大缩减所需的支撑，甚至完全不需要支撑，其原理如图 6.3-51 所示。沿一个水平的分型面将零件分成上型和下型两部分，单独制造这两部分时都可以不需要支撑。首先底朝上制造出下型，然后将下型翻转过来，并进行加温，再从分型面开始继续逐层制造上型。试验表明，上型和下型之间可以得到令人满意的黏结效果。为了在制造上型时将下型固定在加工平台上，在制造下型的过程中沿分型面添加了固定筋，固定筋置于夹具中。固定筋和夹具分别用支撑材料和成形材料堆积而成。Sara McMains 在 FDM1650 机器上成功地实现了该成形方法。它用很少的固定筋和可重复利用的夹具代替了复杂的支撑结构。



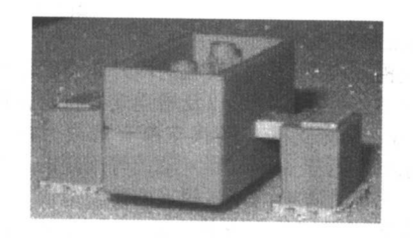


图 6.3-51　通过 "Double Sided" 成形方式消除支撑结构

此外，Seth Allen 和 Deba Dutta (University of Michigan，USA) 提出了一种对 STL 模型进行 "壁厚控制" 从而减少支撑结构的方法 (见图 6.3-52)。该方案适用于只对外表面形状有要求的薄壁零件。根据壁厚和层厚可以计算出相邻两层的悬臂长度。用户指定一个可以不需要支撑的最大悬臂长度值，如果相邻两层形成的悬臂长度超过该值，就加大较低层的壁厚，使其满悬臂长度的限制条件。

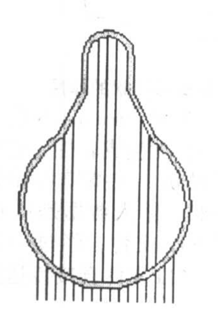
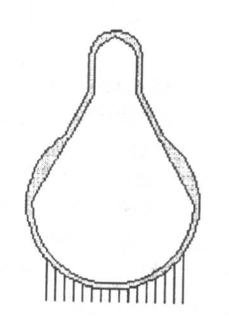



图 6.3-52　通过 "壁厚控制" 减少支撑结构

以上这些支撑生成算法都没有说明如何生成齿形支撑，并且支撑的精度对计算效率有很大的影响。为解决这两方面的问题，清华大学激光快速成形中心提出了齿形支撑生成算法，并完成了用于 SL 工艺的 Gusset 支撑结构 (一种优良的齿形支撑结构)，实践证明该支撑结构的强度、稳定性和易剥离性均达到了很高的水平。

4.4.1　SL 工艺网状支撑自动生成

在生成网状支撑之前，需要将待支撑面离散成一系列的支撑线。每一条支撑线生成其独立的支撑结构，所有这些支撑的集合就构成了位于该待支撑面内部的网状支撑。网状支撑是一个 STL 模型所有支撑结构的主体部分，它以平行于 x 轴和 y 轴的十字交叉薄板对原型提供支撑作用。由于这些薄板相互交叉形成一个整体，因此自身具有一定的强度。其厚度很小，一般为激光光斑直径，并且与原型的接触处为锯齿状，具有较好的可去除性。

在支撑线的基础上，网状支撑的计算全部在相关联截面内完成，因此只涉及到二维图形计算。其计算过程主要分为五步：支撑线的生成、支撑点的提取、支撑的裁减、齿形的生成、支撑 STL 模型的生成。

支撑线是位于待支撑面内部平行于 x 轴和 y 轴的一系列等间距三维线段。每条支撑线都生成其独立的支撑结构，所有这些支撑结构的集合构成了整个待支撑面的网状支撑。由于 SL 工艺中的支撑结构由厚度很小 (0.02 ~ 0.1 mm) 的薄板组成，因此将支撑线向底面投影并和模型本体作干涉处理，即可得到支撑的 STL 模型。这样得到的支撑模型在几何意义上并没有厚度，只是一系列相互平行或者垂直的面片的集合；但在实际造型时，支撑厚度为激光光斑的直径大小。在激光功率一定的条件下，通过控制激光的扫描速度，可以控制支撑结构的强度。图 6.3-53 中阴影部分为待支撑面，在其内部有四条支撑线 $A1B1$，$A2B2$，$A3B3$ 和 $A4B4$。其中 $A1B1C1D1$ 是支撑线 $A1B1$ 相应的支撑结构。

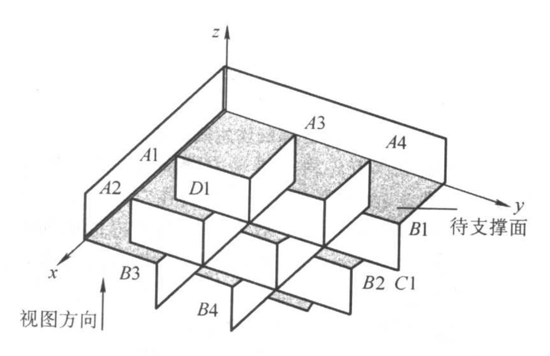


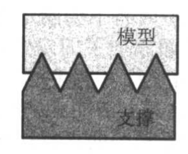
图 6.3-53　位于待支撑面内部的支撑线

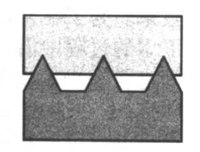
为了便于支撑的去除和提高造型过程中液态树脂的可流动性，支撑结构在其顶部和底部与模型接触的部位为锯齿状。但是为了避免支撑陷入加工平台上的圆孔里，位于平台上的那些支撑底部并没有添加齿形，而是保持原来的矩形形状。

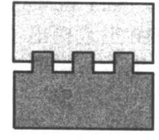
齿形轮廓由四个参数决定：齿顶长度、齿底长度、齿底间距和齿高（见图 6.3-54）。此外，还有一个与齿形相关的支撑生成参数：支撑插入量，该参数控制了齿形插入到模型本体内部的长度。插入量越大，支撑的强度越大，但可去除性也相应降低。

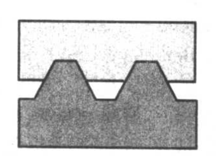
图 6.3-55 是几种典型的齿形轮廓。

图 6.3-55　齿形轮廓参数









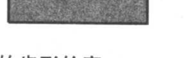


图 6.3-55　典型的齿形轮廓

4.4.2　SL 工艺轮廓支撑自动生成

轮廓支撑结构是沿着模型待支撑区域的内外轮廓线添加的支撑，它在防止模型发生翘曲变形以及增强支撑自身强度方面有着重要的作用。轮廓支撑与网状支撑有着很大的区别，网状支撑由一系列平行于 x 轴或者 y 轴的等间距的薄板组成，而轮廓支撑是由任意方向的首尾相连的薄板组成。两者在形式上的不同决定了它们的生成算法也有很大的区别。为了提高求交运算的效率，预先对模型的所有面片进行了空间划分。对某个待支撑面，轮廓支撑自动生成算法的流程如图 6.3-56 所示。

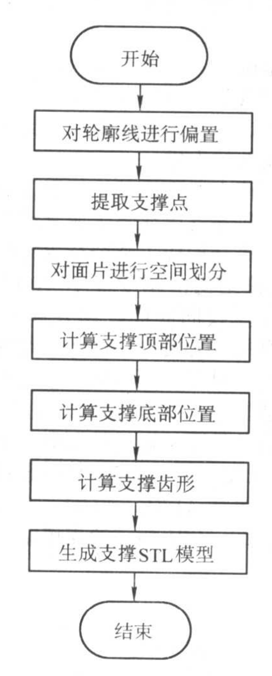


图 6.3-56　轮廓支撑自动生成算法流程图

具体过程如下：首先将三维轮廓线向 xy 平面进行投影，并对得到的二维轮廓线进行偏置。然后在二维轮廓线上按一定间距（支撑点间距）提取支撑点。对待支撑面的所有面片进行 xy 平面上的空间划分，计算所有支撑点的支撑顶部位置；对 STL 模型的所有面片进行 xy 平面上的空间划分，计算所有支撑点的支撑底部位置。然后计算支撑结构的齿形，最后在支撑点的基础上生成支撑的 STL 模型。

轮廓支撑的齿形计算与网状支撑基本类似，都是通过对支撑点的顶部位置和底部位置进行 z 向偏置从而获得相应齿形。但由于在生成轮廓支撑时引入了“虚支撑点”的概念，因此需要额外对虚支撑点进行处理。虚支撑点并不真正参与齿形的计算，只是起到调整支撑形状的作用，使其与待支撑面轮廓线一致。在图 6.3-57 中，A、B、C 三处为虚支撑点，它们并不位于齿形轮廓的顶点上，只是改变了支撑的形状，如同在该处对支撑进行“折弯”，使其吻合待支撑面的轮廓形状。因此，使用虚支撑点之外的其他支撑点来计算齿形位置，所用的算法与网状支撑的齿形计算完全一样，然后通过线性插补得到虚支撑点的支撑顶部和底部位置。

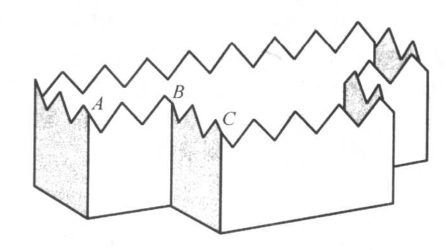


图 6.3-57　虚支撑点对调整支撑形状的作用

清华大学激光快速成形中心开发的 Aurora 1.0 是一种功能强，先进且使用方便的支撑结构自动生成软件，它由四个功能模块组成：显示模块、编辑模块、支撑模块和分层模块。软件的系统框架（见图 6.3-58）。输入数据是从 CAD 造型软件或者三维反求软件得到的 STL 文件，经过一系列编辑、添加支撑、分层等操作后输出 CLI 文件直接传送至控制软件，驱动 SLA 设备。

4.5　SSM 工艺自适应网格划分

4.5.1　SSM 工艺中网格划分的问题

SSM 工艺是快速原型中一个主要工艺，它的一个主要特点是无需添加支撑，但原型完成后，需要将其从废料中剥离出来，如何在保证原型质量及成本的前提下提高废料的可分离性是 SSM 工艺的关键技术之一。废料的去除性能与网格的划分，叠层材料与胶的粘接性等相关。合理的网格划分能弥补一些材料和胶性能上的不足，使废料去除变的简单。现有 SSM 工艺中基本采用等距 x、y 向网格划分，有的 SSM 系统会在大平面和小孔处加密网格，如图 6.3-59 所示。这种方法简单易行，数据处理简单，但对后续的原型剥离工作确造成了极大的困难。一些细微的特征结构，如小孔，曲率很大的曲面，小口内腔等，以通常的网格划分，很难取出。同时，大多数 SSM 原型都对零件有一定的强度要求，以现有



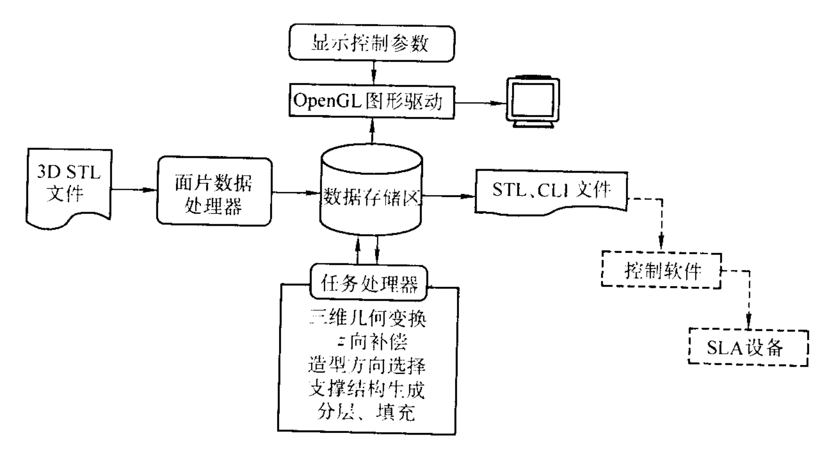


图 6.3-58 "Aurora 1.0"的系统框架图

的网格划分方法，取型时，多少都会对原型的强度造成影响，特别是对于薄壁原形，往往原形取出后，薄壁部分的箔材就已经分离了。

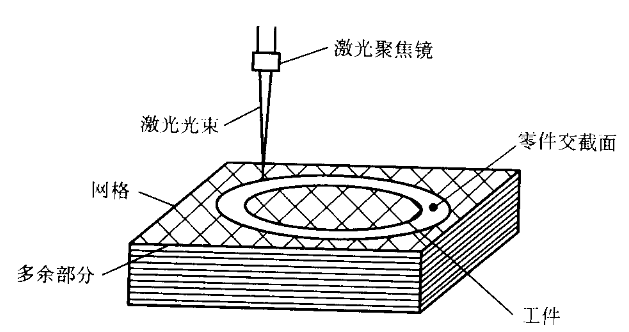


图 6.3-59 SSM 工艺网格划分

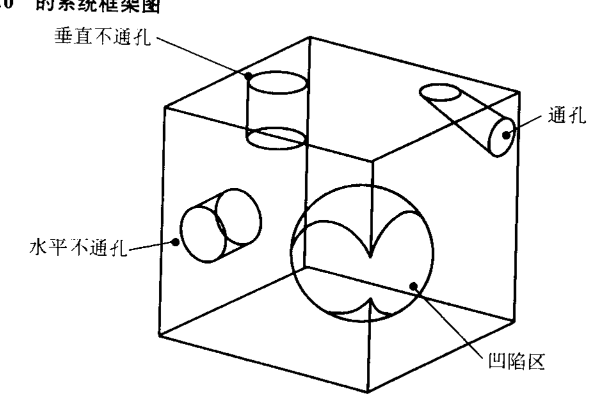


图 6.3-60 网格加密的特征形状

4.5.2 SSM 自适应网格划分规则

大量实践表明，要使废料能方便地分离，网格需满足一定的条件：

1）网格在层间要保持一定的连续性，相邻层网格线在位置上比较接近的时候，废料才容易剥离；

2）对于不同的零件模型，根据其复杂程度采用不同的网格密度；

3）对模型中的精细结构，需要作特殊处理。

根据零件形状特征进行自适应不规则网格划分，可以减少 SSM 原形剥离的难度，提高原形的强度和质量。

首先以较大间距划分基本网格，保证每层的网格在相同位置，将废料分割为矩形块。然后根据模型的形状特征和复杂程度，确定不同的网格密度和网格位置。原型内部的废料相比外部废料剥离的难度加大，有以下几种典型的特征形状需局部加密网格（如图 6.3-60）。

1）通孔，除了各高度上截面都相同的垂直通孔外，长径比大于某一域值（0.5～1）的所有的孔内网格都必须加密。网格密度至少要保证在孔内 x，y 方向各有两条网格线，若该孔截面形状规则，如圆形、矩形、正多边形，也可只有一条网格线。由于水平通孔比垂直通孔难剥离废料，一般网格密度稍高；

2）不通孔比通孔的剥离难度要大，网格密度要更高；

3）凹陷区。

对于不能由特征形状确定网格密度的特征面，则根据其复杂程度决定。复杂程度则用特征面的大小，相邻特征面的数量及相互间的夹角确定，复杂程度高，网格密度大。复杂程度由下面函数确定：

$$f(c)=\frac{\sum l_i\alpha_i}{\sqrt{A}}+\sum k_i \qquad (6.3\text{-}10)$$

式中，l_i 为该特征面第 i 条特征边的长度；α_i 为第 i 条特征边的平均夹角；A 为该特征面的表面积；k_i 为其第 i 个相邻特征的相关比例系数。

4.5.3 网格位置的确定及划分

网格线的划分即是求网格线与原型轮廓的交点。最简单的求交算法是把每个多边形的所有边都放在一个表中，然后求每条网格线与这些边的交点，然后将交点排序输出。因为一条网格线只会与几条边相交，甚至一条边都不相交，所以处理效率很低。为提高算法的速度，采用活性边表法求网格线。它在处理一条网格线时，仅与它相交的多边形进行求交运算，运算速度大大提高。

网格线位置的确定根据轮廓形状的特点应用不同的规则：

（1）小轮廓

封闭环的面积小于一定值时为小轮廓，小轮廓又分为外轮廓和内轮廓。外轮廓沿其包围盒划分 x，y 向各两条网格线，内轮廓则在其包围盒中心划分 x，y 向各一条网格线。为减少网格线的长度，网格线与基本网格相交时终止。如图 6.3-61 所示。

（2）大轮廓

大轮廓网格划分与该区域的网格密度，轮廓形状和轮廓属性有关。大轮廓的网格划分分四个步骤：

1）确定原始网格线（OH）的布局和位置。

2）根据特征分析确定的局部网格密度，加入局部网格线（LH），为减少网格线的长度，网格线与基本网格相交时终止。

3）计算轮廓上与水平线，垂直线相切的点的位置，如图 6.3-62 中的 $P1$，$P2$，$P3$，$P4$ 点。加入通过切点的网格线（TH）。

4）对所有网格进行合并处理，三种网格线的优先级顺序为 *OH*，*TH*，*LH*，距离很近的网格线合并为一条网格线，保留优先级高的网格。

按自适应网格划分算法处理的网格线，可以将模型中不易剥离的部分进行特殊处理，使之根据层片形状选择最适宜的位置分割废料，提高成形后的可分离性。通过 SSM－600 及 SSM－800 等设备上大量应用表明，该算法与传统定间距网格划分方法相比，成形时间虽略有增加，但废料剥离时间大大减少，剥离后原型的强度和完好率也有较大幅度的提高。

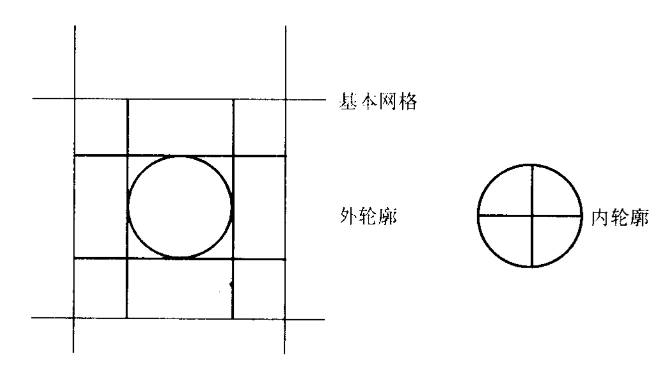


图 6.3-61　小轮廓网格划分

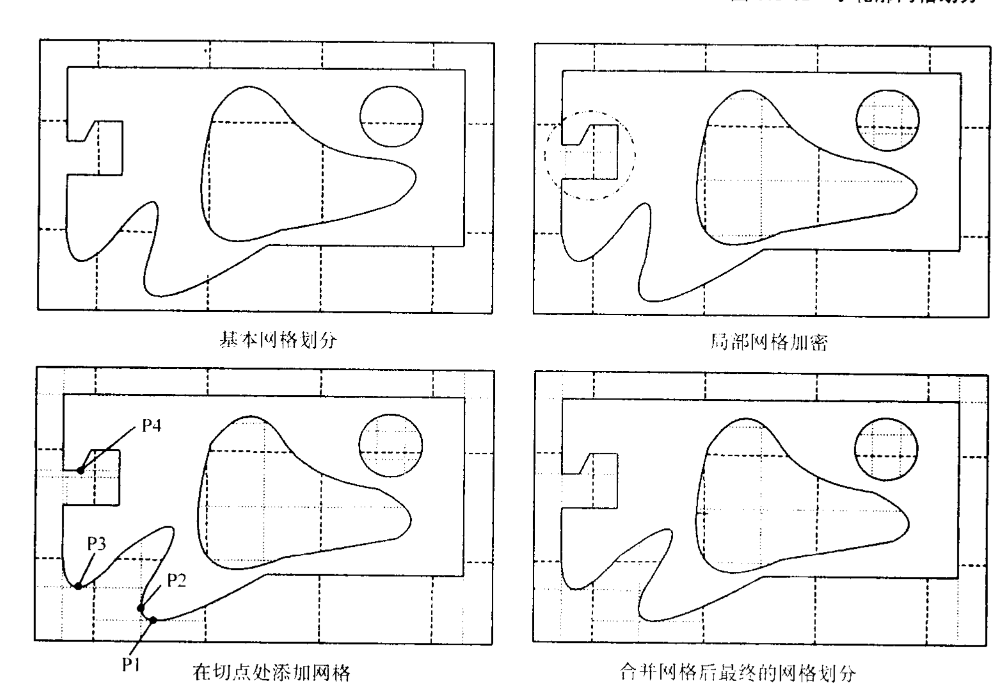


图 6.3-62　层片网格划分

5　分层技术

5.1　基本分层原理

图 6.3-63 表明了三维的实体被分解成一系列的面单元、线单元或点单元，然后按照一定的顺序把这些离散单元（面、线和点）转换成实体的过程。

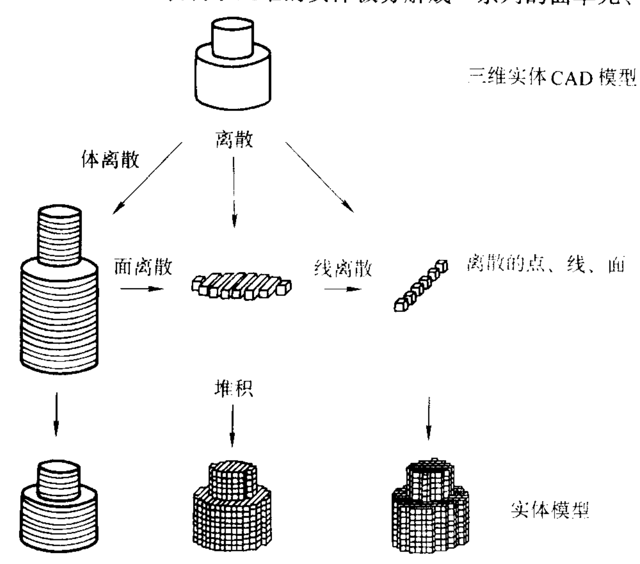


图 6.3-63　快速成形的离散－堆积原理图

常用的离散单元有点单元，线单元，面单元。成形的目的是组织成具有确定几何形状和一定功能的三维实体（零件），点单元和线单元都必须先堆积为面单元才能完成成形过程，因而 RP 研究中都是以面单元进行离散。面单元由一组形状相似但位置不同的面组成，如图 6.3-64 所示。

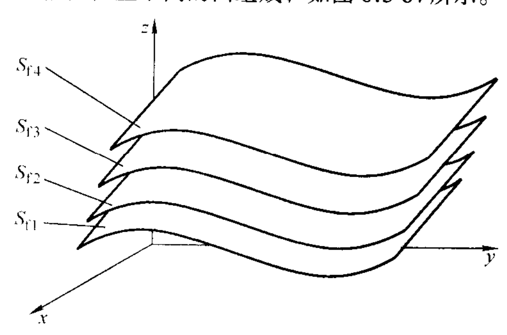


图 6.3-64　离散的面单元

受到工艺及技术条件的限制，当前 RP 工艺的面单元主要为水平面，各单元的间距相等（对于等距分层而言，自适应分层间距是不等的），成形方向都是垂直向上。以等距分层成形一个立方体为例，其离散后如图 6.3-65 所示。

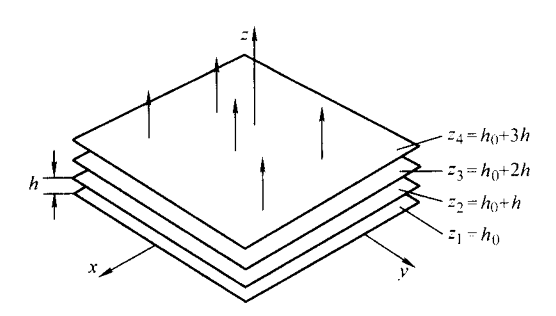


图 6.3-65　等距分层成形一个立方体

以球面单元成形球体时，如图 6.3-66 所示，其中，成形面为一系列同心球面，球面的间距相同。

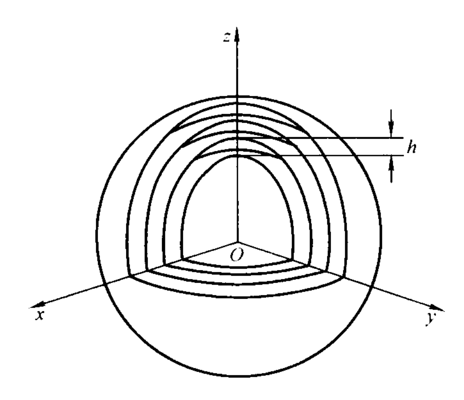


图 6.3-66　球面单元成形

对 STL 格式的三维面片模型沿 z 轴方向进行平面剖切操作，生成截面轮廓信息，并以层片文件格式输出分层信息，如图 6.3-67 所示。

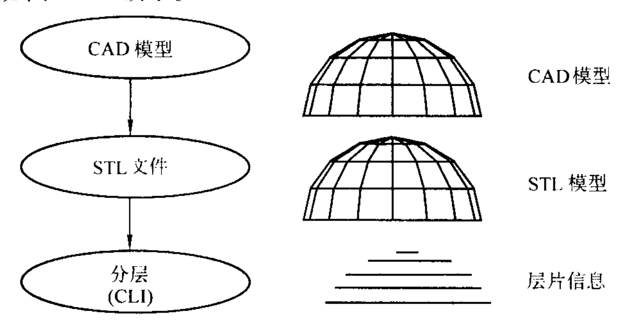


图 6.3-67　对 STL 文件的分层

STL 文件分层算法的核心是平面与三角形面片的求交，常用的分层算法如图 6.3-67 所示。由于每次求交都要将所有面片搜索一遍，并通过比较将与截面相交的面片找出来；而且还要将求出的相交线段头尾相连构造多义轮廓线，因此算法花费时间较长，为了加快计算速度，清华大学提出采用多处理器并行算法来处理分层，可使分层时间大大改善，但需占用更多的硬件资源。

图 6.3-68 的算法是对 STL 文件直接作分层处理，没有利用拓扑信息，每层都必须对所有三角形面片进行比较求交。

在重建 STL 文件拓扑信息后，可以利用拓扑信息优化上述分层过程，使分层效率大大提高，其基本原理如下：

如图 6.3-69 所示，根据分层的 Z 值首先找到一个与此 z 平面相交的一个三角形 F_1，由三角形 F_1 的顶点 V_1（x_1，y_1，z_1）和 V_2（x_2，y_2，z_2）的坐标值可以直接算出交点 P（x_p，y_p，z_p）的坐标值：

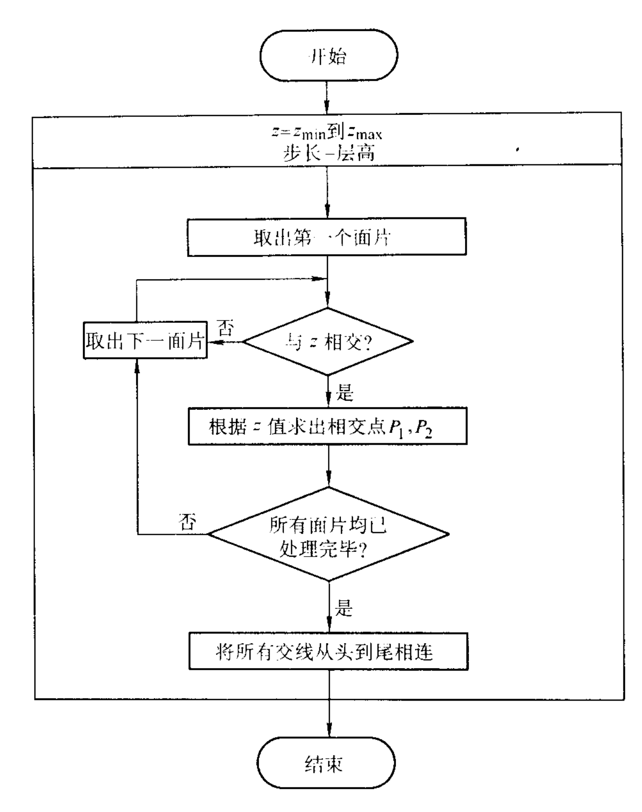


图 6.3-68　常用的分层算法

$$\begin{cases} \dfrac{x_p - x_1}{x_2 - x_1} = \dfrac{z_p - z_1}{z_2 - z_1} \\ \dfrac{y_p - y_1}{y_2 - y_1} = \dfrac{z_p - z_1}{z_2 - z_1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_p = x_1 + \dfrac{z_p - z_1}{z_2 - z_1}(x_2 - x_1) \\ y_p = y_1 + \dfrac{z_p - z_1}{z_2 - z_1}(y_2 - y_1) \end{cases}$$

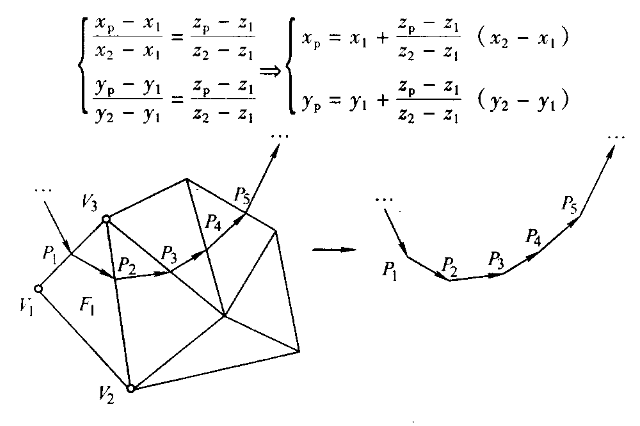


图 6.3-69　利用拓扑信息的分层算法示意图

在求出 P_1 和 P_2 点后，可根据法向确定出线段 P_1P_2 的方向，并根据拓扑信息找出与之相邻的下一个三角形面片，可依次算出 P_3，P_4，P_5…，最后再回到 P_1，从而得到一条闭合的有向轮廓线，即为本层分层后的轮廓线。算法如图 6.3-70 所示。与图 6.3-68 的算法相比，主要有以下优点。

1）不需要每次对所有面片进行搜索，因而减少了搜索时间。

2）原来每个三角形面片与 z 平面求交需计算两个端点，而改进算法只需计算一个端点。

3）改进算法直接得到的就是首尾相连的有向闭合多义线，不需要对求得的线段重新分类连接。

图 6.3-71 为采用图 6.3-70 分层算法得到的一个零件分层后的显示图像。

通过建立 STL 模型拓扑关系，利用 STL 模型连续性，可以大大提高 STL 模型的分层速度。

同时，一个三角形面片可能会与多个分层面相交。例如，一个三角形面片的一条边与 k 个分层面相交，求取 k 个交点 xy 坐标，只需计算第一次交点，其后可以根据在单



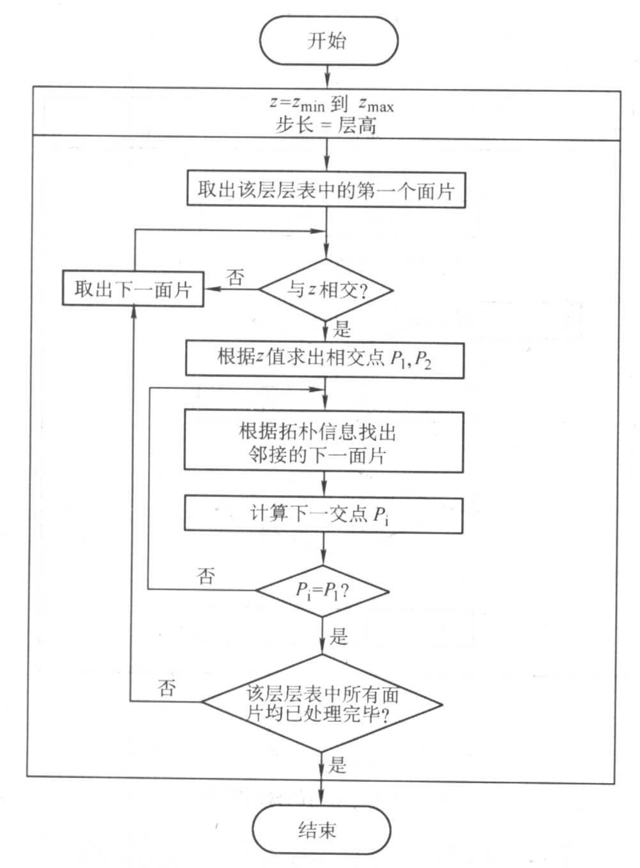
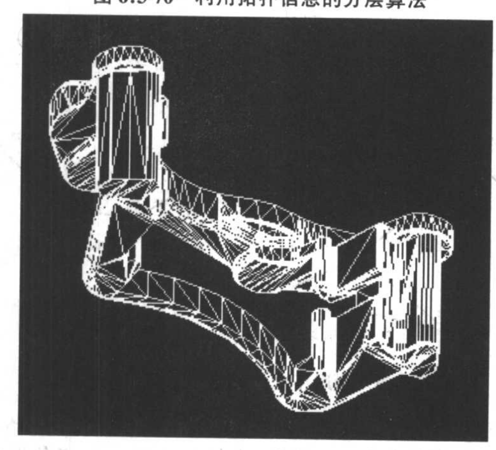
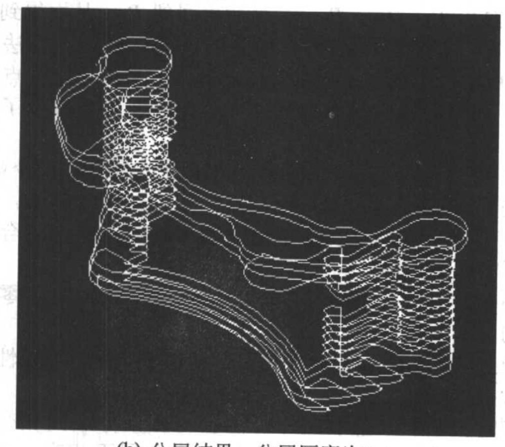


图 6.3-70　利用拓扑信息的分层算法



(a) STL 文件



(b) 分层结果，分层厚度为4mm

图 6.3-71　优化分层算法得到的分层

位 z 方向上 xy 增量算出其他交点，可以大大减少乘除法运算（见图 6.3-72）。

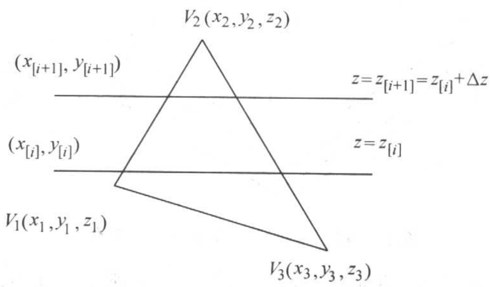


图 6.3-72　多分层面与三角面片相交

模型分层作为降维和离散过程，不可避免会引入误差并导致成型精度的降低，出现所谓台阶效应，如图 6.3-73 所示。

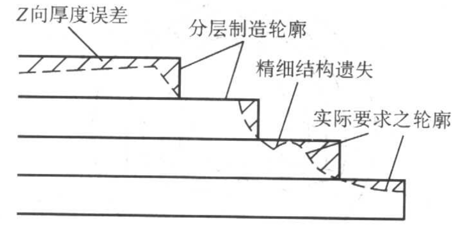


图 6.3-73　快速原型的原理性误差

台阶误差是快速成形工艺的原理性误差，不可能完全消除。为减少台阶效应对原型精度和表面质量的影响，可以采用减小分层层厚，自适应分层，CAD 直接分层及曲面分层等方法进行优化。

5.2　减小分层层厚

减小层厚可以降低离散误差，减小台阶效应，但分层厚度受材料和成形工艺的限制，只能在一定范围内进行调节，仅依靠降低层厚来提高造型精度有很大限制；另一方面，单层层厚越小，模型总层数越多，因而成形时间就越长，会导致造型效率的降低。

5.3　自适应分层

自适应分层即以不同的层厚对零件模型进行分层，层片的厚度随着零件表面的几何特征变化，一般来说当零件表面曲率大时，层片采用较小的层厚，以提高表面精度；当零件表面曲率小时，采用用户给定的最大层厚进行分层，以减少层片数目，提高加工效率。由于减小了台阶效应，自适应分层可以获得更好的表面质量。

5.3.1　自适应分层的适用工艺

一些快速原型工艺在加工过程中各层层厚是固定的，因而无法应用自适应分层技术，但多数快速成形工艺都可以在一定范围内改变层厚，如立体光刻（SL）、选择性激光烧结（SLS）和熔融挤压制造（MEM）等工艺。这些工艺可以通过改变激光的功率（或者喷头的直径），在造型过程中控制材料的输出量等方式实现层厚的改变。SSM 工艺也可以部分的采用自适应分层，通过调节激光的功率，同时切割一层或多层材料来实现层厚的调节。另外三维印刷（3DP）、弹道粒子喷射（BPM）等工艺对此也有着很好的应用前景。

一般来说，各种工艺在层片厚度的选择上都有一个范围：

$$t_{pmin} \leqslant t_p \leqslant t_{pmax} \tag{6.3-11}$$

其中 t_p 是允许的层片厚度，随 RP 工艺的不同而不同，t_{pmin} 和 t_{pmax} 是加工时的最小层厚和最大层厚。一些常用 RP



工艺的参考值如表 6.3-5。

表 6.3-5　一些 RP 工艺所允许的层片厚度

RP 工艺	最小层片厚度 t_{pmin}/mm	最大层片厚度 t_{pmax}/mm
SL	0.063 5	0.762
MEM	0.127	0.762
SSM	0.050 8	0.381
SLS	0.076 2	0.508

5.3.2　自适应分层的基本原理

自适应分层的基本原理是根据零件局部的表面特征，在满足用户设定的误差基础上，按照一定的分层算法选择适当的层厚，实现对零件的分层。具体为，由用户给定需要满足的误差，自适应分层算法通过相应的函数可得出当前层任意给定位置 $p(i)$，在满足用户设定的误差条件下所允许的最大分层厚度 $L_{p(i)}$。在这些 $L_{p(i)}$ 中最小的一个就可以选为下一层片的层厚。当然层厚的选择还要受到制造设备的加工能力 $\{L_{min}, L_{max}\}$ 的限制。最终的层厚 L_{slice} 为

$$L_{slice} = \max\{L_{min}, \min\{L_{max}, L_p\}\}$$

为了能够在所设定的误差范围里制造出零件，同时又不能在分层过程中遗失模型的关键特征，在进行自适应分层前，必须先识别出模型上的关键特征。通常，关键特征包括平面和尖点，如图 6.3-74 所示。

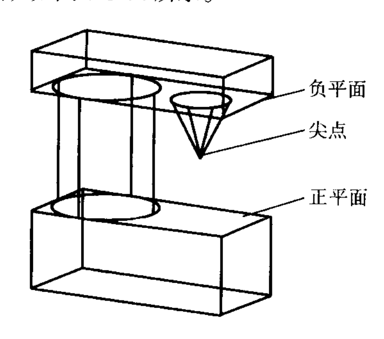


图 6.3-74　关键特征的识别

当平面的法向量方向与分层平面的法向量方向相同时，即

$$\frac{A_i - A_j}{A_i} \geqslant \delta \tag{6.3-12}$$

此时定义该平面为正平面，与此类似，当

$$\frac{A_i - A_j}{A_i} \leqslant -\delta \tag{6.3-13}$$

此时定义该平面为负平面。

上两式中，A_i 为模型在 Z_i 高度处轮廓信息；A_j 为模型在 Z_j 高度处轮廓信息；t 为分层厚度；δ 为轮廓偏差比率。

尖点（peaks）则是一些很小的突起，很容易在分层中被忽略。当出现尖点时，分层截面的轮廓数目会改变，因此可以通过判断分层截面轮廓数目的改变来判断是否存在着尖点。

5.3.3　自适应分层算法分析

目前，在自适应分层上的学术讨论十分活跃，从自适应分层的基本原理出发，针对不同的目标并结合各自实际的工艺，人们提出了许多不同的实现方法。

Dolenc 等人首次提出了尖端高度（cusp height）的概念，如图 6.3-75 所示，并用它作为位置误差的标准来评估分层中台阶效应的影响。

Suh 和 Wozny 基于尖端高度的概念，将自适应分层算法应用于非多面体零件，通过尖端高度计算出分层厚度。

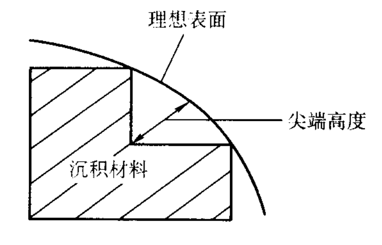


图 6.3-75　尖端高度

以上介绍的自适应分层算法在很大程度上提高了层片制造的能力，但还存在以下两方面的不足：第一，这种通过逐步增加层厚的方法需要连续的处理数据，抑制了连续分层和后面的数据处理过程；第二，这种通过当前层片来推测零件表面的方法会丢失曲率突变的区域。考虑到这两点，人们又在此基础上提出了改进的自适应分层算法。

Kamesh Tata，Georges Fadel 和 Amit Bagchi 等人提出了关键特征（key characteristic，KC）和复杂度（complexity level）的概念，即通过关键特征的识别及复杂度的判别来提高分层的精度。所谓的关键特征，主要包括零件上的基本特征平面（如水平面、垂直面等）、特征的类型（如突出面和下凹面）以及一些定位特征和零件的几何形状等。该算法识别关键特征，并结合回退处理确定下一层的分层位置。

Jamieson 和 Hacker 提出了一种截然不同的自适应分层方法，采用标准层厚对零件进行分层，进而比较相邻层片的轮廓线来判断层厚是否还可以增加。由于缺少误差的衡量标准，这种方法只能适用一定形状的零件。

在此基础上，Zhiwen Zhao 和 Luc Laperriere 于 1999 年提出了基于面积比较的自适应分层算法。该算法是根据当前层的面积和上一层面积的差值来决定当前层的厚度。当差值较大时，该算法判断两层有较大的改变，从而应当降低当前层的厚度。这种方法的优点是计算量较少，缺点是歧义情况比较多。

清华大学结合 CAD 模型自适应分层的特点，提出了基于二维轮廓比较的轮廓比较自适应分层算法。整个算法主要包括两个部分：第一部分为模型关键特征的识别，模型的关键特征主要包括正平面、负平面以及尖点等，在关键特征识别的基础上将模型分为相应的块，每个块内部不再含有关键特征；第二部分为层厚优化，即根据指定的二维轮廓偏差比率（contour deviation ratio）在块的内部对层厚进行优化，实现自适应分层。

轮廓比较法是一种间接的方法，它通过比较当前层的几何轮廓和上一层几何轮廓的偏差来推测零件的表面几何特征，当相邻两层轮廓偏差值较大时，该算法判断两层间的几何特征有较大改变，当相邻两层轮廓偏差值较小时，该算法判断两层间具有相似的几何特征，如图 6.3-76 所示。

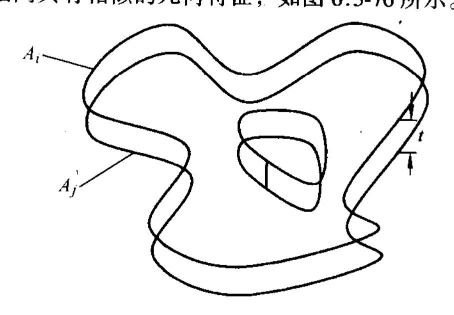


图 6.3-76　轮廓比较法原理

A_i—模型在高度 Z_i 处轮廓信息；
A_j—模型在高度 $Z_i + t$ 处的轮廓信息；t—分层厚度

整体的基于轮廓比较的自适应分层算法流程如图 6.3-77

所示。

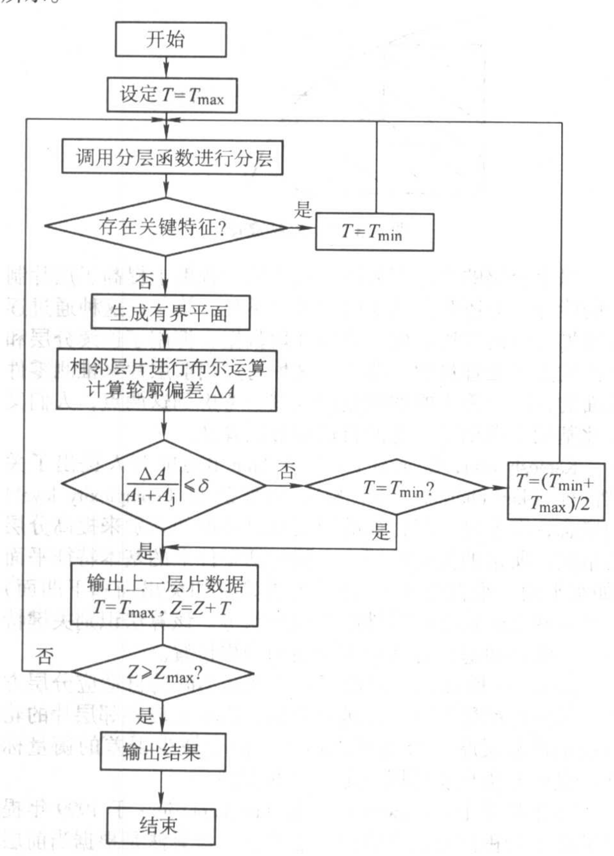


图 6.3-77　CAD 模型自适应分层的整体流程

5.3.4　自适应分层实例及分析

下面以一个太极球实体模型为例，将等厚分层与自适应分层进行对比。图 6.3-78a 是太极球的实体模型，图 6.3-78b 是太极球实体模型等厚分层得到层片文件，图 6.3-78c 是太极球实体模型自适应分层得到层片文件。其中等厚分层的层厚为 1.0 mm，自适应分层的最大层厚为 2.0 mm，最小层厚为 0.2 mm。从图 6.3-78b，图 6.3-78c 的对比中可以看出，CAD 模型自适应分层在保持成形效率的同时，有效的减小了台阶误差，提高了零件的成形精度。图 6.3-79 给出了在分层厚度不变，不同轮廓偏差比率下等厚分层与自适应分层的对比结果。结果表明，采用自适应分层算法后，在相同的成形精度下，成形速度可以提高 50% 左右。

5.4　CAD 直接分层

STL 作为 RP 标准数据转换格式，有其不可替代的优势，但也有很多缺点，如精度损失，数据冗余，不含拓扑信息等。为降低 STL 文件转换过程中的精度损失，可以直接对 CAD 进行分层，从而在根本上解决从 CAD 到 RP 的数据转换问题。在 CAD 系统内进行直接分层具有以下优点：

1）压缩数据文件大小，提供更高的模型精度。

2）减少 RP 成形设备的前处理时间，提高 RP 加工效率。

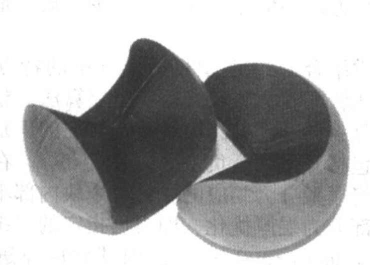
3）无需进行拓扑信息的提取及文件错误的修正。

4）直接利用数控系统的曲线插值功能，提高零件的表面质量和精度。

5）提高 RP 与 CAD 系统的集成度。

5.4.1　CAD 系统的选定

CAD 模型的直接分层、自适应分层同 CAD 系统的选定是结合在一起的，不同的 CAD 系统提供的造型功能及开发



(a) 太极球的实体模型



(b) 等厚分层



(c) 自适应分层

图 6.3-78　等厚分层与自适应分层

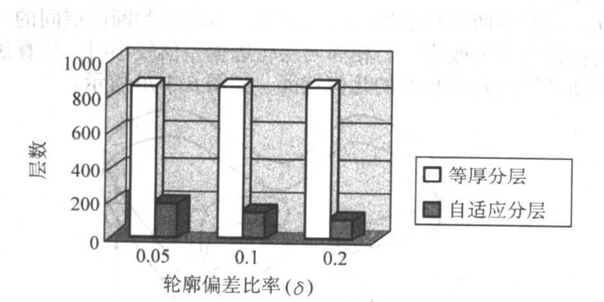


图 6.3-79　等厚分层与自适应分层层数对比

接口是不同的，因此，选定一个适合快速原型工艺的 CAD 系统就显得十分重要。

当今的三维 CAD 平台市场百花齐放，在汽车、航天、电子、家电等行业都得到了广泛的应用。高端的系统主要有 UG，Pro/E，CADDS5，I－DEAS，这些 CAD 系统主要以图形工作站为硬件支撑平台，在产品几何造型、运动分析、计算分析、数控编程及绘图方面的功能都很强。目前也开始发行用于 PC 机的版本，如 UG NX，Pro/E Wildfire 等；中端的 SolidEdge，SolidWorks 则是运行在便宜的 PC 机上，这一优势使其对于数量众多的中小型客户具有极大的吸引力，但曲面造型功能不及高端 CAD 系统；低端的 AutoCAD，CAD－KEY 等是以二维为主逐渐向三维扩展的 CAD 系统，目前拥有许多二维设计的用户。尽管这些 CAD 系统建模技术和功能强弱不同，但它们的出现无疑大大的推进了 CAD 技术在现代化生产中的广泛应用，同时也带动了快速成形技术在各个领域的应用。

同传统的对 STL 文件进行分层相比，对 CAD 模型直接分层需要更为复杂的算法。不过，大多数的商用 CAD 造型软件都提供了求截面轮廓的函数，所以对于 CAD 模型直接分层的研究需要 CAD 开发商，RP 服务商以及用户三者结合起来共同进行。

5.4.2 CAD 直接分层软件系统

CAD 模型直接分层的数据处理过程如图 6.3-80。首先在 CAD 系统中对三维模型直接进行剖切分层，生成层片轮廓，然后对层片进行工艺规划，输出工艺路径，用矢量文件对其进行记录，控制软件处理矢量文件，生成快速成形设备所能接受的数控代码。

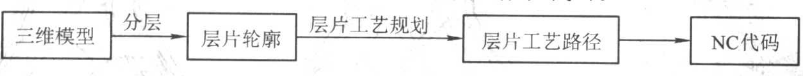


图 6.3-80 CAD 模型直接分层的数据处理

根据 CAD 模型直接分层的数据处理过程及 RP 工艺的具体要求，CAD 模型直接分层的数据处理软件系统包括以下三个主要部分：CAD 模型的直接切片，截面轮廓信息提取和层片工艺规划。CAD 模型的直接切片处理主要考虑的是离散—堆积过程中的离散过程，将三维几何实体模型转换为层片数据；截面轮廓信息提取则根据直接切片后获得的层片数据，经过转换和处理提取出轮廓的拓扑信息；层片工艺规划主要是对截面轮廓信息进行填充和数据的无损失输出。下面以 UG 为开发平台，介绍 CAD 直接分层数据处理软件。

（1）直接切片

由于不同的 CAD 系统采用不同的建模技术，因此 CAD 模型直接分层需要深入了解 CAD 系统描述实体的方法。UG 以 Parasolid 几何造型核心为基础，采用基于约束的特征建模和传统的显示几何建模方法为一体的复合建模技术。Parasolid 是基于边界描述来表示实体的，它通过面和边对实体进行描述，如图 6.3-81 所示。面是描述实体的主要元素，它由反时针方向的环边围成。有向环边按右手法则取向，沿着闭合的棱边所得的方向与表面外法矢的方向一致。

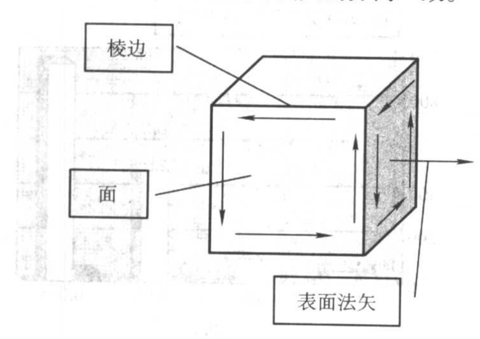


图 6.3-81 Parasolid 的实体表示图

在 CAD 模型直接分层中，薄板实体（sheet solid）具有重要意义，它是一种具有零厚度的特殊实体，如图 6.3-82 所示。它至少由一个封闭的环边和两个与其相连的面组成。两个面具有相同的几何特征，但有不同的法向。薄板上的任何一个孔洞都需要一个附加的环边来包围它。

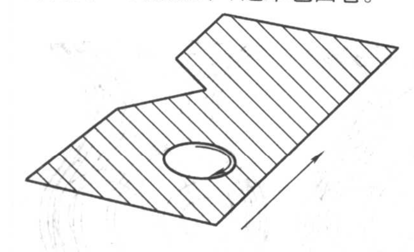


图 6.3-82 薄板实体

借助薄板实体，就可以在 CAD 实体模型分层时，用平面去切割 CAD 模型，获得面表及由面表得到的薄板实体，在薄板实体就包含了环边和棱边信息，进而通过对这些几何信息的提取生成输出文件。

分层算法以查询 CAD 实体模型的最低点和最高点开始，沿 Z 向进行分层，通过连续调用单独层片的分层函数即可实现对整个 CAD 实体模型的分层并得到包含有层片轮廓信息的链表，读取链表中的数据，根据不同的曲线类型进行相应的处理最终输出符合 RP 成型设备需要的文件格式。整体的直接分层流程如图 6.3-83 所示。

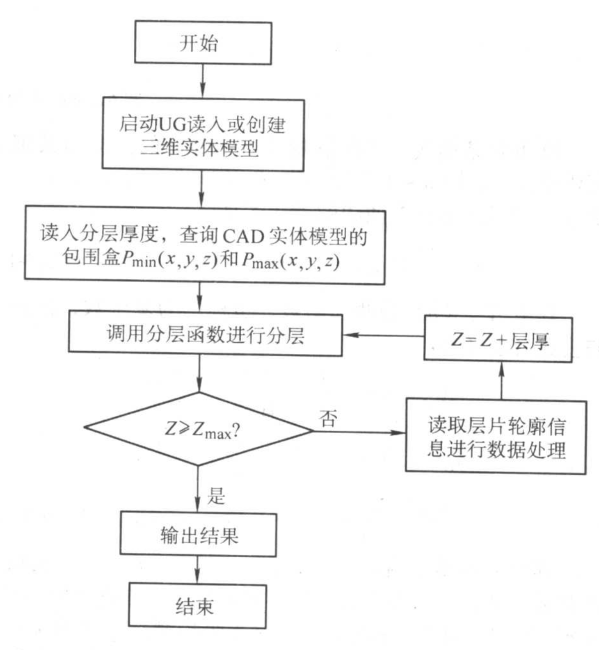


图 6.3-83 CAD 模型直接分层的整体流程

图 6.3-84 为 CAD 模型直接分层后的显示图像。其中图 6.3-84a 为花瓶的实体模型，图 6.3-84b 为花瓶的 CAD 模型直接分层结果，图 6.3-84c 为花瓶的 STL 模型分层结果。

（2）截面轮廓信息提取

经过直接切片，我们得到了精确的零件层片信息，主要通过以下三种曲线类型表示出来：直线、圆弧曲线和 B 样条曲线。但这些由直接分层得到的曲线数据是无顺序存储的，为了得到每个层片的轮廓信息，必须对这些曲线进行截面信息的提取。

1）直线　直线的数据结构比较简单。由于它并不涉及坐标系的转换，因此只需记录直线两个端点的（x，y，z）坐标即可。

直线的存储结构为

```
LINE    curve_data [0-2]    = first point
        curve_data [3-5]    = second point
```

2）圆弧曲线　同直线相比，圆弧曲线需要记录较多的数据来确定其最终的形状和位置。其中记录圆弧形状的数据包括：圆弧的起始角、终止角、半径。记录圆弧相对位置的数据包括：圆心的坐标以及确定构造平面的 X，Y 坐标轴。

圆弧曲线的存储结构为：

```
ARC     curve_data [0]      = start angle
        curve_data [1]      = end angle (radians)
        curve_data [2]      = radius
        curve_data [3 - 5]  = center
        curve_data [6 - 8]  = X axis of the construction
```

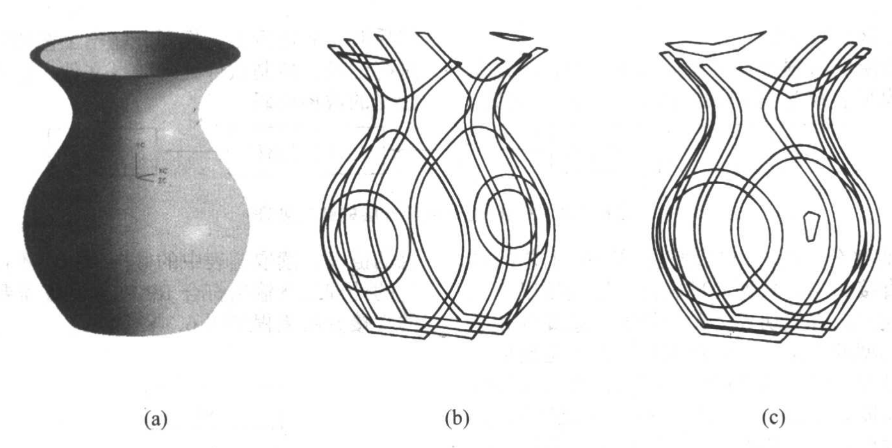


图 6.3-84 CAD 模型直接分层结果显示

3）B 样条曲线 B 样条曲线需要存储的数据与其定义密切相关。已知 $n+1$ 个控制点 P_i（$i=0, 1, \ldots, n$），K 阶（$K-1$ 次）B 样条曲线的表达式是：

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n} P_i N_{i,k}(u) \qquad (6.3\text{-}14)$$

其中 $N_{i,k}(u)$ 是调和函数，也称之为基函数，按照递归公式可定义为：

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & \text{若 } t_i \leqslant u < t_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u-t_i)\ N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1}-t_i} + \frac{(t_{i+k}-u)\ N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k}-t_{i+1}} \quad (t_{k-1} \leqslant u \leqslant t_{n+1}) \qquad (6.3\text{-}15)$$

其中 t_i 是节点值，$T=[t_0, t_1, \ldots, t_{L+2k-1}]$ 构成了 K 阶 B 样条函数的节点矢量，其中的节点是非减序列，且 $L=n-k+1$。可见，由空间的 $n+1$ 个控制点生成的 k 阶 B 样条曲线是由 L 段 B 样条曲线逼近而成的，每个曲线段的形状仅由点列中的 k 个顺序排列的点所控制。因此，存储 B 样条曲线需要记录下其节点矢量和控制点。

B 样条曲线的存储结构为

B－CURVE curve _ data [0] = number of poles //控制点数目
curve _ data [1] = order //B 样条阶数
curve _ data [*] = knot sequence (curve _ data [0] + curve _ data [1]) //节点矢量
curve _ data [*] = array of homogeneous poles (wx, wy, wz, w) //控制点及其权值

5.4.3 案例分析

下面以一个花瓶的实体模型为例，对比一下 CAD 模型直接分层同传统的先将 CAD 模型转换为 STL 模型进而再进行分层的结果。对比主要从以下两个方面进行，一个是模型文件大小的对比，另一个是模型精度之间的对比。

首先，从模型文件大小来看，图 6.3-85 为不同转换精度下 CAD 实体模型向 STL 面片模型转换时文件大小的对比。

其中 δ 为离散误差，即三角面片与实际表面的弦高，δ 越小，精度越高。

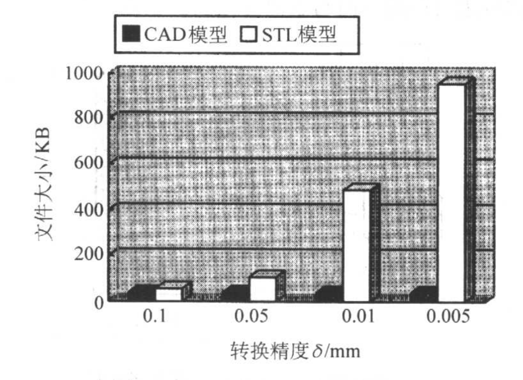


图 6.3-85 CAD 模型与 STL 模型文件大小对比

下面从模型精度的角度将 CAD 直接分层同 STL 模型分层做一对比，图 6.3-85a)、b)、c)、d）显示的是不同转换精度下分层后的结果。其中分层厚度为 1 mm。

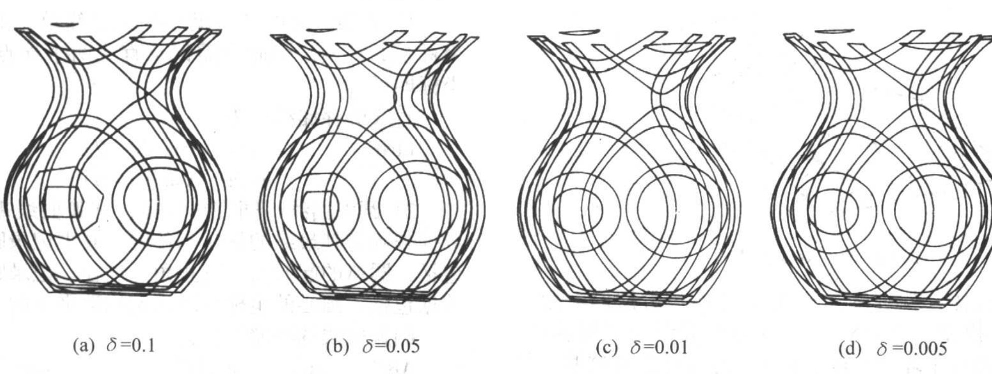


图 6.3-86 不同精度 STL 模型分层结果

从上面的对比显示中可以看出，经过 CAD 模型直接分层得到的层片文件没有任何的精度损失，具有最高的精度。而对于先进行从 CAD 模型到 STL 模型的数据转换，然后对 STL 模型进行分层的方式，在从 CAD 模型到 STL 模型的转换



过程中造成了模型精度的损失，而且损失的精度随着模型的转换精度不同而变化。模型转换精度越低，造成的精度损失越大，层片文件的精度也大大降低。若要保持一定的层片精度就需要设定较高的转换精度，但这样会导致 STL 文件的数据量大大增加，文件中的缺陷和错误也随之增加，使得 RP 加工的前处理时间加长，零件的表面质量和精度降低。

5.5　曲面成形和曲面分层

受到材料、工艺、控制等多方面条件的限制，现有 RP 工艺均以平面对三维模型进行离散。通过对现有 RP 工艺的分析，可知大部分工艺中都有一个共同的步骤：材料准备过程，如 SL 工艺上升液面刮平，SSM 工艺铺纸热压，3DP 工艺铺一层粉末材料。正是这个准备过程造成只能以平面作为成形面，且同一层片中各个位置的成形高度都相同。在众多的成形工艺中，MEM 工艺不存在材料准备的过程，其材料从喷头中挤出，随即完成堆积成形过程，并且材料挤出速度可以实时控制，因而可在不同的位置以不同的成形高度来制造原型，为突破平面成形提供了可能。图 6.3-87 为平面分层和曲面分层的示意图。

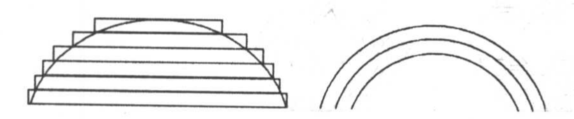


图 6.3-87　平面分层和曲面分层

经过试验研究，证实通过对分层技术和成形控制技术的改进，MEM 工艺可以实现曲面成形，从而消除部分表面上的台阶效应，提高原型的整体精度和表面质量。图 6.3-88 为用 MEM 工艺制作的一直纹曲面原型，曲面成形技术完全克服了其上表面的台阶误差问题。

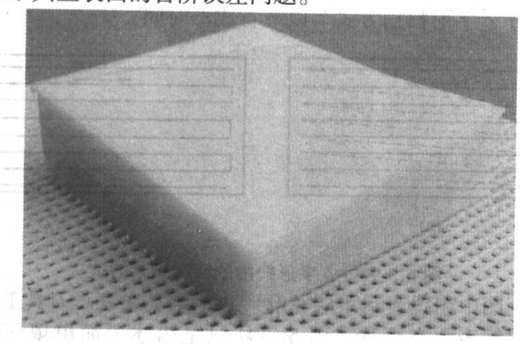


图 6.3-89　曲面成形的直纹曲面原型

曲面分层是曲面成形的关键技术之一。现有分层技术都是用一系列不同高度 x，y 平面与 CAD 模型求交，而曲面分层则是以一系列的曲面与 CAD 模型求交。分层曲面如何确定是分层技术中的关键之一。曲面成形是为了解决小倾斜度表面的台阶误差问题，所以分层曲面需根据零件表面来确定。如图 6.3-89 中的零件，其上表面为曲面，下表面为平面，以曲面成形，要保证上下表面都没有台阶误差，所以在零件的上下表面，分别以 1，5 两个曲面为分层面，中间以 2，3，4 三个分层面进行过渡。构造分层曲面的第一步是根据 CAD 模型的形状特点，构造一些关键曲面，这些曲面应该和 CAD 模型部分表面重合，以消除这些表面上的台阶效应；第二步再根据这些关键曲面，构造更多的中间过渡分层面，以保证层与层之间不会出现超出系统成形能力的层厚。

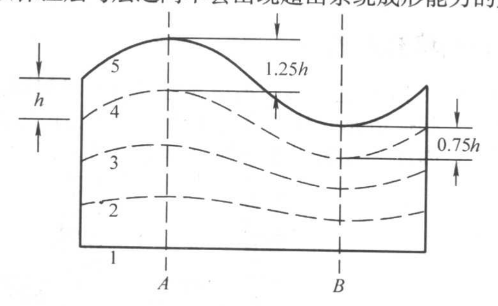
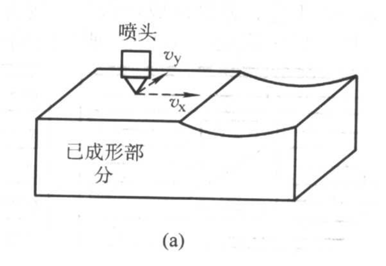


图 6.3-89　曲面分层

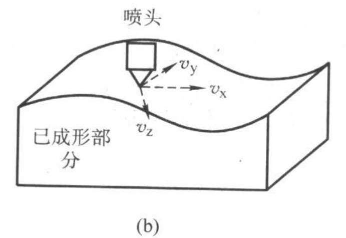
由于 MEM 喷头有一定的体积，曲面成形时其有与已成形部分有发生干涉的可能，所以分层曲面的形状受到一定的限制：一是曲面的斜度，二是曲面的曲率。斜度和曲率的范围受喷头大小和形状的限制，其取值需保证喷嘴不会在成形过程中破坏已成形部分。一般情况下，分层面应是连续平缓变化的，可以用三角面片逼近，类似 STL 模型的表示方式，这样分层算法就是求模型上的三角面片和分层面上的三角面片之间的交线。所有的交线连成环，就得到了层片轮廓，而该层片应为轮廓所包围的那部分分层面。由于分层面的变化较平缓，故层片的填充规划可以在其投影的平面二维层片上计算，与平面分层相同。

成形控制技术是曲面成形的另一关键技术。与以往的 RP 工艺不同，曲面成形的扫描系统由 xy 两轴联动变为 xyz 三轴联动，如图 6.3-90 所示。xy 两轴联动，喷头只在 xy 面运动，不会和已制造的原型发生干涉，运动控制比较简单。曲面成形时，喷头或工作台必须有 z 向运动，如果三个轴的运动不协调，则有可能破坏已成形部分。喷头的运动轨迹依分层面的形状确定，需保证不接触已成形部分。

以一系列曲面对 CAD 模型进行分层，不同层片，不同位置的材料堆积强度也不同，所以扫描的同时必须对材料挤出速度进行匹配控制，以防止材料过堆或欠堆。材料挤出速度由扫描速度与成形高度两者共同决定。



(a)



(b)

图 6.3-90　平面成形和曲面成形的运动控制

当前，曲面成型和曲面分层尚处于研究阶段，还有以下一些技术问题需要解决：

1）构造分层曲面，包括确定关键曲面和构造过渡曲面。

2）分层算法，现有分层算法用平面和 CAD 模型求交，而曲面和 CAD 模型的求交算法则复杂得多。

3）喷头运动轨迹控制。由于制造一个层片时增加了 z



轴的运动，需使用三轴联动的运动控制系统，同时喷头的运动还要避开已成形原型，防止造成破坏。

4）材料输送匹配。需根据喷头的运动速度和各点的成形高度实时控制材料的挤出量，消除过堆和欠堆。

6　扫描路径填充

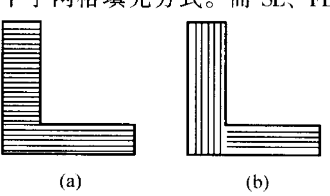
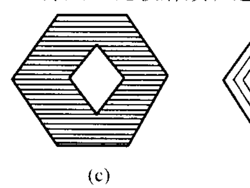
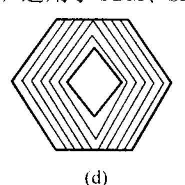
由于RP成形过程所独具的特点，在进行每一层的具体成形时，除了要进行轮廓扫描外，还要进行一定形式的轮廓内部实体扫描填充。如在LOM工艺中，进行轮廓扫描切出该层轮廓形状后，还要将非轮廓部分切成一个个的小方块，以便于原型/零件成形后可以方便地取出；在SLS或SL或FDM等工艺中，则需要对轮廓内部原型实体部分进行一定形式的密集的堆积扫描（填充），以生成该层的实体形状。

6.1　扫描填充方式

对不同的RP工艺，其扫描填充方式也不尽相同，比如LOM工艺，扫描填充的目的是为了将成形截面内不需要的部分切碎，因此一般采用十字网格填充方式。而SL、FDM和SLS等工艺，扫描填充的目的是为了截面轮廓内部成形，采用的填充方式主要有单向扫描、十字网格扫描、多向扫描、螺旋形扫描、Z字形扫描和沿截面轮廓偏置扫描等。扫描填充方式不同，则其扫描线的长度就不一样，扫描线越长，因扫描开始和停止而造成的启停误差就越少。另外，成形件的力学性能、成形时的热传递方向等都与扫描填充方式有关。

1）单向扫描　单向扫描填充方式是最简单的填充方式，一般是沿着一个轴（*X*或*Y*轴）方向进行扫描，如图6.3-91a和6.3-91c所示。这种扫描方式数据处理简单，但扫描短线段较多，因此而产生的启停误差较大，而且成形件的机械性能不好，一般适用于FDM、SLS等工艺。

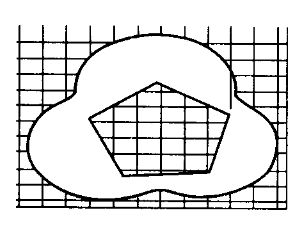
2）多向扫描　为了改善单向扫描的不足，以减少因短线段而造成的误差，可以采用多向扫描方式，即判断模型截面轮廓形状，自动选择沿长边的方向扫描，如图6.3-91b和6.3-91d所示。这种扫描方式可以部分地改善单向扫描所造成的误差及成形件的力学性能，但因带有一定的智能性，软件处理比较麻烦，适用于FDM、SLS等工艺。

(a)　(b)　(c)　(d)

图6.3-91　单向及多向扫描方式

3）十字网格扫描　即沿着*X*和*Y*轴两个方向进行扫描，如图6.3-92所示，这种填充方式仅适用于LOM和SL工艺。由于这两种工艺的成形方式不同，其生成网格的方式也不同。



(a) 适用于LOM工艺　(b) 适用于SL工艺

图6.3-92　十字网格扫描方式

4）螺旋形扫描　如图6.3-93所示，以多边形（环）的几何中心为螺旋线的中心，从这一点出发，做一些等角度的射线，以渐进的方式从一条射线到另一条射线生成螺旋形的扫描线。这种扫描方式因为是从中心向外逐渐成形，可以大大改善成形过程中的热传递以及成形件的力学性能，而且扫描线较长，可以减小启停误差。

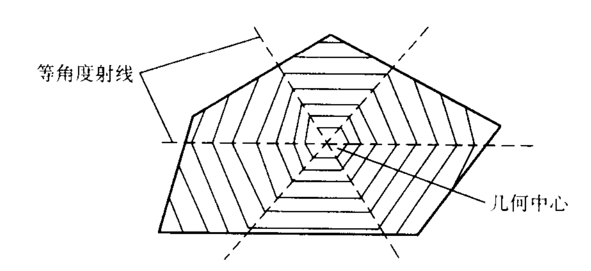
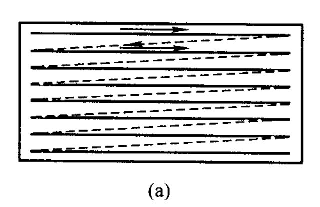
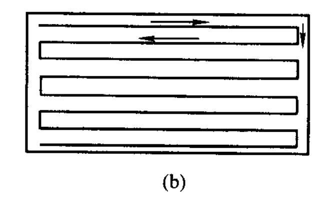


图6.3-93　螺旋形扫描方式

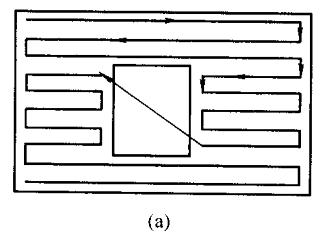
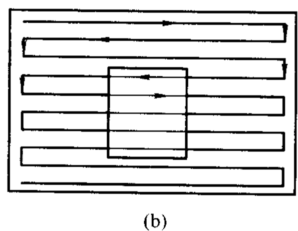
5）*Z*字形扫描　从一定意义上来说，*Z*字形扫描与*X*或*Y*单方向网格扫描基本相同，只是从扫描路径来说，还包含了空行程，从而需对后者做进一步处理。*Z*字形扫描有两种基本形式，如图6.3-94所示，图中箭头指示了行走方向。在图6.3-94a中，只沿单方向进行扫描，每扫描完一条线后，回到起始边后再接着扫描下一条边，有较多的空行程。在图6.3-94b中，扫描是沿着两个方向进行，从而可大大减少空行程，节省扫描时间。所以RP扫描一般均采用图6.3-94b所示的*Z*字形扫描方式，以节省成形时间。

(a)　(b)

图6.3-94　*Z*字形扫描的两种基本方式

上图中粗线表示该层轮廓形状，细实线表示刀具工作路径，虚线表示空行程。图6.3-94只是描述了简单填充的情况，而对于复杂零件，则要考虑其具体形状作进一步处理。如图6.3-95所示，当零件含有内孔时，可有两种扫描方式，一种如图6.3-95a所示，进行分区*Z*字形扫描；另一种则如图6.3-95b所示，在内孔区走空行程，即不进行成形作业。对于不同RP工艺，可根据工艺特点选择合适的扫描方法，如SLS工艺，刀具即成形执行机构为激光，由于激光可快速通断，即可采用图6.3-95b所示的扫描方式。

(a)　(b)

图6.3-95　含内孔零件的*Z*字形扫描方式

6）沿截面轮廓偏置扫描　这种扫描方式主要是针对FDM工艺而设计的，因为FDM工艺中存在着喷丝开、关滞

后，不易控制的现象，所以每一层堆积成形过程中最好少一些启停动作，以减少滞后的不良影响，提高成形精度。扫描线越长，则因扫描短线段而产生的启停误差越小。偏置扫描就是为了使扫描线尽量长的一种填充方法。

轮廓偏置扫描的核心是偏置扫描线的生成。在算法上，这一过程与刀具补偿路径生成相似，只是须重复进行偏置环的计算，以生成所有的扫描线，如图 6.3-96a 所示。由于须重复进行偏置环的计算，计算量较大，而且可能产生更多的干涉环，另外还可能出现很多小块区域无法进行完整的偏置，因此这一方法的实现比较困难。

在求出所有偏置环后，还可对各次偏置产生的多边形环作进一步处理，使之尽可能地连成一个环，如图 6.3-96b 所示。

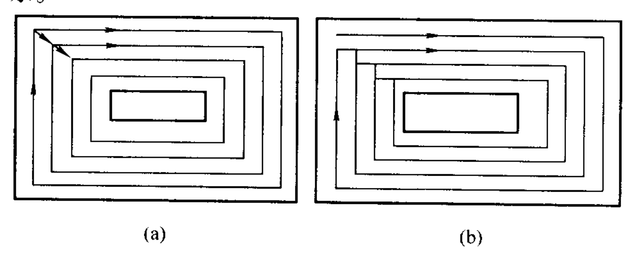


图 6.3-95　偏置扫描方式

7）复合填充扫描　综合 Z 字形扫描和偏置扫描两种方式，可以采用一种复合填充方式，如图 6.3-97 所示。在内外轮廓线附近一定区域内采取偏置填充方式，而在其它区域则采取 Z 字形填充方法，这样既能保证成形件表面精度，亦可避免或减少在偏置环计算中出现“孤岛”和干涉环。

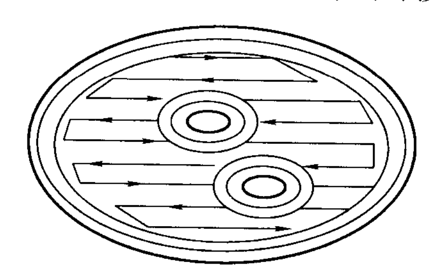


图 6.3-97　复合填充扫描方式

6.2　扫描填充算法及软件设计

由于填充方式很多，不同的 RP 工艺可采用不同的扫描方式，因此扫描填充软件应能根据不同的工艺类型，自动地选择最合适的填充方式，也可由用户决定（输入）扫描填充方式。

下面以十字网格扫描方式为例，说明扫描填充算法。

如图 6.3-98 所示，十字网格扫描是沿着 X 和 Y 轴两个方向进行扫描，算法的核心是十字网格线的生成。只需沿 X 和 Y 轴方向做平行线，使其与分层轮廓相交，求出所有的交点，然后再对交点沿 X 和 Y 轴方向排序，生成并输出网格线。

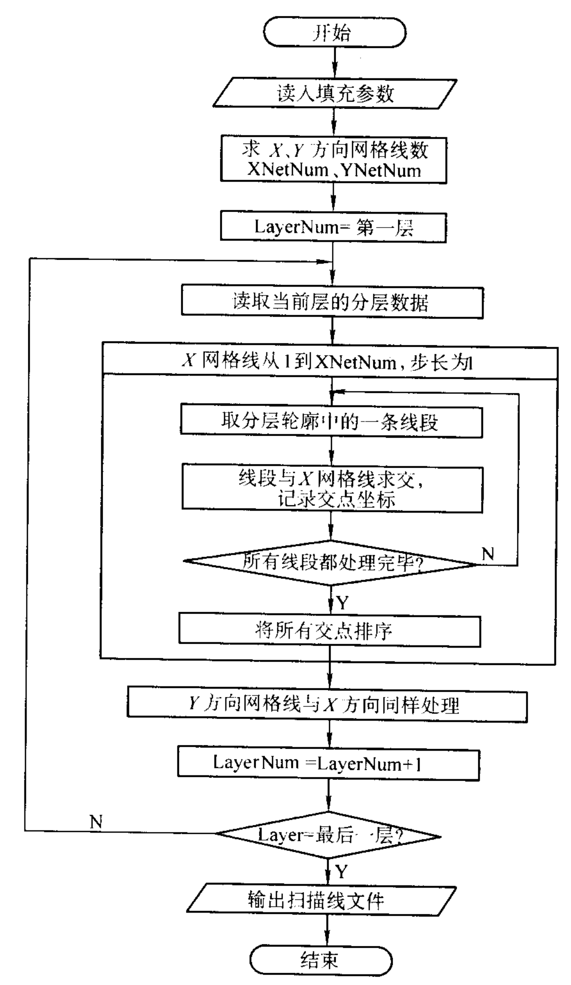


图 6.3-98　十字网格扫描算法流程图

编写：颜永年（清华大学）

第4章　光固化快速成形工艺

1　光固化快速成形工艺

1.1　光固化快速成形工艺的定义

光固化快速成形，又称立体光刻、光成形等，是一种采用激光束逐点扫描液态光敏树脂使之固化的 RP 成形工艺。该工艺是美国的 C. Hull 于 1986 年研制成功的，称为 SL (Stereolithography) 工艺，1988 年美国 3D Systems 公司推出第一台商用样机 SLA－1 (Stereolithography Apparatus－1)。

光敏树脂是一种由感光性预聚物、感光性单体、光反应引发剂、增感剂、热聚合阻聚剂、非感光性聚合物、溶剂及各种添加剂组成的液体高分子材料，它可接受一定波长的射线能量发生光聚合反应而固化。不同类型的光敏树脂可以在 γ 射线、X 射线、紫外线（UV）、电子束甚至是可见光的照射下固化。目前用于光固化工艺中的光敏树脂主要为紫外线固化树脂。

实际上，经常应用于光引发聚合反应的类型通常为自由基聚合和阳离子聚合，或两种聚合反应同时存在。就聚合的基元反应来说，两种聚合反应是相同的，均包括链引发、链增长（或转移）和链终止三个阶段；但由于两种聚合反应的聚合活性中心不同，其过程特征有很大区别。

以自由基聚合反应为例，光聚合过程分为三部分：

1）链引发过程

$$I + h\nu \rightarrow 2R\cdot$$
$$R\cdot + M \rightarrow (R-M)\cdot$$

自由基（R·）通过光触发因子 I 吸收合适频率的光子 $h\nu$ 后形成，这些自由基和单分子发生链式反应。

2）链增长过程

$$(M_n\cdot) + M \xrightarrow{kp} (M_{n+1}\cdot)$$

单分子 M 和分子（$M_n\cdot$）之间连接成更大的（$M_{n+1}\cdot$）分子，其中 kp 是链增长的反应速率，它随单分子的减少与胶体粘度的增加而降低。

3）链终止过程　导致链式反应终止的反应有：再结合反应，歧化反应和包藏反应。

$$(M_n\cdot) + (M_m\cdot) \longrightarrow \begin{cases} M_{n+n} & \text{（再结合反应）} \\ M_n + M_m & \text{（歧化反应）} \\ \{M_n\cdot\} + \{M_m\cdot\} & \text{（包藏反应）} \end{cases}$$

再结合反应包括两个自由基结合成一个非反应的分子。歧化反应包括将 β－氢从一个自由基转变成另一个，产生两个聚合物分子，其中一个饱和，另一个不饱和。经照射后横向连接的聚合物中仍有自由基存在，因而宏自由基在聚合物网中的包藏反应是光固化树脂的主要终止方式。

光固化快速成形工艺的基本原理如图 6.4-1 所示。树脂槽中储存了一定量的光敏树脂，由液面控制系统使液体上表面保持在固定的高度，紫外激光束在振镜控制下按预定路径在树脂表面上扫描。扫描的速度和轨迹及激光的功率、通断等均由计算机控制。激光扫描之处的光敏树脂由液态转变为固态，从而形成具有一定形状和强度的层片；扫描固化完一层后，未被照射的地方仍是液态树脂，然后升降台带动加工平台下降一个层厚的距离，通过涂覆机构使已固化表面重新充满树脂，然后进行下一层固化，新固化的一层黏结在前一层上，如此重复直至固化完所有层片，这样层层叠加起来即可获得所需形状的三维实体。

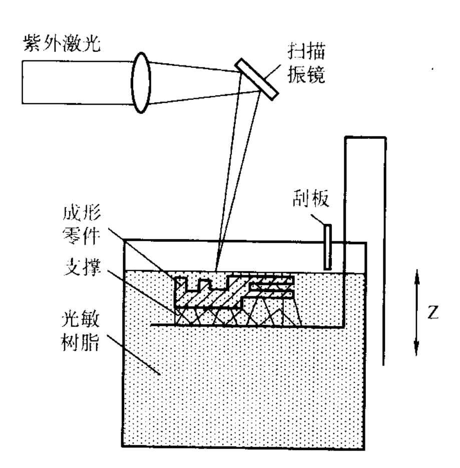


图 6.4-1　光固化成形的基本原理

完成的零件从工作台取下后，为了提高零件的固化程度，增加零件强度和硬度，可以将其置于阳光下，或者专门的容器中进行紫外光照射。最后，对零件进行打磨或者上漆，以提高其表面质量。

1.2　光固化快速成形工艺的特点

光固化快速成形工艺作为快速成形技术的一种，所依据的仍然是离散－堆积成形原理。但是，由于层片成形机理的特点，导致光固化快速成形工艺具有如下特点。

1）成形精度高　由于光固化工艺的扫描机构通常都采用振镜扫描头，光点的定位精度和重复精度非常高，成形时扫描路径与零件实际截面的偏差很小；另一方面，激光光斑的聚焦半径可以做得很小，目前光固化工艺中最小的光斑可以做到 25 μm，所以与其他快速成形工艺相比，光固化工艺成形细节的能力非常好。

2）成形速度较快　离散－堆积成形过程中，材料的离散与其堆积是矛盾的统一，离散得越细小，精度越高，但成形速度越慢。可见在减小光斑直径和层厚的同时必须极大地提高激光光斑的扫描速度。美国、日本、德国和我国的商品化光固化成形设备均采用振镜系统（两面振镜）来控制激光束在焦平面上的平面扫描。325～355 nm 的紫外激光热效应很小，无须镜面冷却系统，轻巧的振镜系统可保证激光束获得极大的扫描速度，加之功率强大的半导体激励固体激光器（其功率在 1 000 mW 以上）使目前商品化的光固化成形机最大扫描速度可达 10 m/s 以上。以如此大的扫描速度进行扫描，在扫描过程中扫描轨迹已呈现出一种面投影图案，使各点固化极其均匀和同步。美国 3D Systems 公司的新型 SLA－7000 设备比原 SLA－5000 平均成形速度提高了 4 倍，我国北京殷华公司 Auro－350 等设备也属高速扫描 SL 系列。

3）扫描质量好　现代高精度的焦距补偿系统可以实时地根据平面扫描光程差来调整焦距，保证在较大的成形扫描平面（600 mm × 600 mm）内具有很高的聚焦质量，任何一点的光斑直径均限制在要求的范围内，较好地保证了扫描质量。

4）成形件表面质量好　由于成形时加工工具与材料不接触，成形过程中不会破坏成形表面或在上面残留多余材料，因此光固化工艺成形的零件表面质量很高。另一方面，



光固化成形可采用非常小的分层厚度，目前的最小层厚达 25 μm，因而成形零件的台阶效应非常小，成形件表面质量非常高。

5）成形过程中需要添加支撑　由于光敏树脂在固化前为液态，所以成形过程中，对于零件的悬臂部分和最初的底面都需要添加必要的支撑。支撑既需要有足够的强度来固定零件本体，又必须便于去除。由于支撑的存在，零件的下表面质量通常都差于没有支撑的上表面。

6）成形成本高　光固化设备中的紫外线固体激光器和扫描振镜等组件价格都比较昂贵，从而导致设备的成本很高；另一方面，成形材料光敏树脂的价格也非常高，所以与熔融挤压成形、分层实体制造等快速成形工艺相比，光固化工艺的成形成本要高得多。但光固化成形设备的结构与系统比较简单。振镜扫描系统与绘图机式扫描系统相比，既简单高效又十分可靠；在高速运行下无振动；采用 SL 工艺的系列设备的升降台和刮平系统也具有简单可靠的优点。

光固化成形工艺与其他快速成形工艺相比存在其特有的一些优点，同时也有一些不足之处。但是，不论对哪种快速成形工艺而言，精巧设计的硬件系统、功能完备的软件系统和合理的工艺规划都是成功实现该工艺的必要条件。

2　光固化快速成形工艺的硬件

2.1　光固化快速成形设备的总体组成

光固化快速成形设备是一种典型的机电一体化设备，它包括多个功能模块。功能模块是实现某一特定功能的具有标准化、通用化和系列化的模块。功能模块在形式上，对于硬件表现为具体的设备、装置或电路，对于软件则表现为具体的应用子程序或软件包。根据功能独立性原则，光固化设备可以划分为如下几个子系统：

1）光路扫描系统　提供成形用的能量源，实现成形扫描时激光光束的偏转和焦距补偿。主要组件包括激光器、扫描振镜、焦距补偿机构和光路基准板等。

2）工作台升降系统　实现成形过程中 Z 向的分层运动，使得光固化过程中的层层堆积成为可能。

3）涂覆刮平系统　当固化完一层后，工作台下降一个层厚的距离，涂覆系统在已成形零件的表面重新涂覆上一层均匀的树脂，然后进行下一层固化。

4）液面控制系统　将树脂液面保持在激光聚焦的焦平面上，以保证固化时激光光斑大小和激光能量符合设定指标。

5）温控系统　控制成形空间内的温度在合适的范围内。

6）机床本体　为光路扫描系统和其他运动系统提供基准支持。

7）数控控制系统　将分层后的零件（包括支撑结构）数据转换成相应的数控代码，控制扫描系统、工作台升降及涂覆系统，完成零件的制作过程。

图 6.4-2 表示了各子系统之间的关系和系统内信息流、物质流的流向，显示了系统的总体结构。

光固化快速成形设备自 1987 年推出商品化产品以来，国内外的光固化设备生产商已经推出了许多型号的光固化成形设备，不同设备的具体实现细节均有各自的特点，但由于执行同一种成形工艺，也存在一些共性。总的来说，光固化成形设备的实现方案可以分为顶部聚焦法、底部聚焦法和双激光聚焦法三类。

顶部聚焦法是大多数光固化设备采用的一种方案，其原理如前面的 6.4-1 所示。激光器和扫描机构组成的光路系统位于树脂槽上方，激光光束从树脂液面上方射入并聚焦于树脂上表面，光固化反应发生的液面的上表面。成形完一层后，

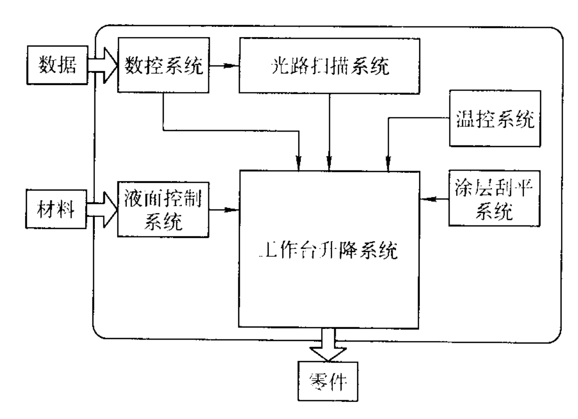


图 6.4-2　光固化设备的系统结构图

工作台下降一段距离，由涂覆机构在已成形零件的表面重新涂覆上一层均匀的树脂，然后进行下一层固化。这种方案实现比较简单，零部件的加工量不大，但是由于光敏树脂的黏性较大，在成形完一层后，必须借助涂覆机构来使已成形层表面重新布满树汁，因而涂覆机构的涂层质量和涂层效率直接影响设备的成形精度和成形效率。

底部聚焦法最早出现于日本，主要用于精细光固化设备上，其基本构成如图 6.4-3 所示。该方案中成形液槽的底部由透明介质制成，激光光束从树脂槽底部透射并聚焦在树脂液面的底部，成形时光固化反应发生在树脂液的底面，成形完一层后工作台上升一个层厚的距离，然后进行下一层固化。这种方法的特点是固化面在液体内部，树脂上表面的波动对成形影响很小，避免了涂覆过程，从而提高了成形效率和成形质量。但底部聚焦法也存在一个致命的缺点，由于树脂液槽的底板是由透明介质制成，其厚度与底板平面尺寸有关。当要求成形空间很大时，透明底板的厚度就随着增大。这样一方面它对激光光束的吸收增大，衰减了激光能量；另一方面，激光光束在穿过底板时折射效果更加显著，扫描光点的定位精度受到影响。由于受成形空间的限制，底部聚焦法多用于精细加工的光固化设备上。

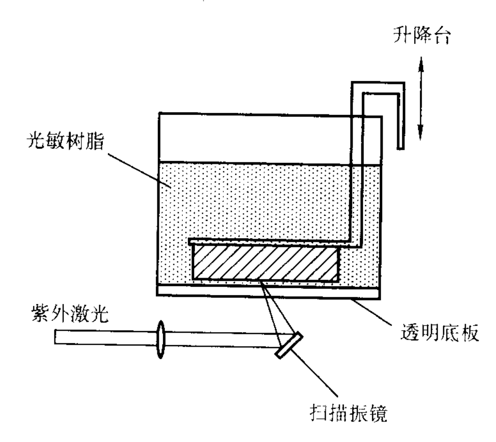


图 6.4-3　底部聚焦法示意图

葡萄牙 Polytechnic Institute of Leiria 采用双激光聚焦法进行新型光固化成形工艺和设备研究，目前尚无商品化设备推出。双激光聚焦法的结构如图 6.4-4 所示，它采用两束激光共同聚焦于树脂液面下的某点，控制激光束的能量使得光敏树脂只能在两束激光共同聚焦的地方发生光固化，双激光聚焦点可以控制在液面内部一定范围内，从而可以直接固化出一定形状的三维实体，配合工作台的升降即可制作出所需的零件。这种方法结合了顶部聚焦法和底部聚焦法的优点，同时避免了涂层工艺和透明介质的衰减问题，是一种很有发展前途的光固化实现方案。双激光聚焦法的不足之处在于采用

图 6.4-4 双激光聚焦法示意图

两套光路系统成本大大提高；另一方面扫描控制也复杂了许多，由于两束激光共同聚焦于一点时各自的光程不同，因而焦距补偿及振镜扫描误差的补偿都大大的复杂化。

2.2 光固化成形设备的子系统

如前所述，光固化快速成形设备由光路扫描系统、液面控制系统、涂覆刮平系统、工作台升降系统、温控系统、机构本体和数控系统等功能模块通过相应的接口有机的结合在一起，其中光路扫描系统、液面控制系统和涂覆刮平系统比较重要。

1）光路扫描系统　光路扫描系统要求在扫描时能保证预定的光点定位精度、聚焦光点的大小、扫描速度和动态响应性能，其实现方案可以分为 xy 打印式扫描和振镜扫描两类，表 6.4-1 列出了两类扫描方式和几种振镜商品的相关参数。

表 6.4-1 不同光学扫描系统的技术指标分析

扫 描 方 式	振 镜 扫 描				绘图机式扫描
产 品 型 号	General Scanning Inc.		Scanlab		
	HPM10 VM2	HPM15VM2	HurryScan 10	HurryScan 20	
焦距/mm	254	254	160 （f－θ 透镜）	163 （f－θ 透镜）	
光点大小/μm	41	33	80		400
扫描区域/mm²	180×180	185×185	600×600 （VarioScan20）	600×600 （VarioScan20）	
扫描速度/m·s⁻¹	>4.5	>3.6	7（f－θ 透镜）	6（f－θ 透镜）	0.2
未校准的非线性	±0.6%	±0.16%	2.1mrad	2.1mrad	xy 单向精度 0.05 mm
价格	高	高	高	高	低

从上表中可以看出，从扫描速度和定位精度来说，振镜式扫描的性能比绘图机式扫描要高得多，虽然其成本也要高很多。目前多数光固化成形设备均采用振镜式扫描系统，只是在一些低成本经济型的光固化设备中采用绘图机式扫描机构。

振镜是一种低惯量扫描器（low inertia scanner，缩写为LIS），是指用反射镜偏转光束并具有低转动惯量转子的扫描器，它早已用于科学研究和工业中的光学扫描。随着计算机和激光技术的进步，低惯量扫描器得到了很大发展，它被广泛应用于近代的光、机、电仪器中，例如，激光标记机、光微调机、激光打印机、图像传真、图像处理、激光照排、印刷板曝光、制作缩微胶片、激光扫描显微镜、红外前视探测仪、激光扫描检眼镜、演出厅投影仪等都使用了低惯量扫描器。

二维平场扫描的振镜光路结构如图 6.4-5 所示，振镜由

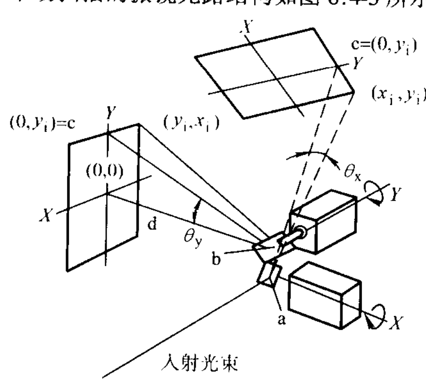


图 6.4-5 二维平场扫描的光路图

两面光轴相互正交的反射镜组成，入射光束通过两面反射镜反射聚焦在扫描区域内，两面反射镜的不同偏转角组合对应着扫描区域内不同点的坐标。

二维扫描时的聚焦误差是采用振镜扫描机构必须要考虑的问题。X 轴和 Y 轴反射镜的中心分别为点 a 和点 b。扫描点 c 的坐标为（0，y_i）。d 是 b 到输出平面坐标中心（0，0）点的距离。X 轴和 Y 轴的扫描角分别为 θ_X 和 θ_Y。像平面上任意的坐标为（x_i，y_i），当 $x_i=y_i=0$ 时，$\theta_X=\theta_Y=0°$。y_i 和 θ_Y 之间的关系可以表示为

$$y_i = d\tan\theta_Y \tag{6.4-1}$$

x_i 的表达式为

$$x_i = \overline{ac}\tan\theta_X \tag{6.4-2}$$

式中，$\overline{ac}=\sqrt{d^2+y_i^2}+e$，而 $e=\overline{ab}$，于是

$$x_i = \left(\sqrt{d^2+y_i^2}+e\right)\tan\theta_Y \tag{6.4-3}$$

如果把 a 点到像平面上任意点（X_i，Y_i）之间的距离叫做 f_i，则

$$f_i = \sqrt{(d^2+y_i^2+e)^2+x_i^2} \tag{6.4-4}$$

二维扫描系统的聚焦误差为

$$\Delta f = \sqrt{\left(\sqrt{d^2+y_i^2}+e\right)^2+x_i^2}-(d+e) \tag{6.4-5}$$

在光固化工艺中扫描区域位于光敏树脂的上表面，聚焦平面为一个水平面，因此为了保证扫描时能实现平面聚焦，必须进行焦距补偿。

二维振镜扫描系统校正聚焦误差的方法有两类：后物镜（成像）法和前物镜（成像）法。成像物镜在扫描系统之后的称为后物镜法；成像物镜在扫描系统之前的称为前物镜法。后物镜法一般采用 f－θ 物镜，这种物镜工作时能保证



平面聚焦，在整个扫描范围内，聚焦光斑均匀，直径不变；在聚焦平面内光斑线性扫描（假设光束以均匀的角速度扫描入射）；有一个足够大的视场。

前物镜法可以结合动态焦距变换器，像差校正的效果更好，它是由主计算机，高分辨率几何图形校正计算机，三路数模转换电路，*X*、*Y*、*Z* 方向的三套伺服驱动器，二维扫描系统，成像透镜和动态焦距变换器等组成。扫描图形的X、Y坐标数据是由主计算机产生的，并把它输入到高分辨率几何图形校正计算机中，在该计算机的内存中存有扫描系统校正的数据，它把由主计算机送来的数据经过校正得到实际的 *X*、*Y* 方向扫描转角和 *Z* 方向焦距修正值，校正后的数据经数模电路去驱动 *X*、*Y* 扫描器和动态焦距变换器，从而消除聚焦误差和枕形误差造成的图像失真，得到一个无像差的扫描图形。典型的动态焦距变换器的直径为 10 mm，焦距最大移动量为 10 mm，用 9 ms 时间就可以完成。如果需要更大的移动距离，则需要用光学杠杆机构。如果要求更高的聚焦精度，还可以将上述两种方法结合起来，即在振镜前采用动态焦距变换器，在振镜后采用 f－θ 物镜。

2）液面控制系统　由于光固化成形时激光光束的聚焦平面就在树脂液面的上表面，因此成形过程中必须保证树脂液面稳定在这一位置，而成形过程中工作台的升降及固化后树脂的收缩都会引起液面高度变化，所以成形过程必须对液面高度进行控制。液面控制系统的实现方案通常分为浸块式和溢流式两类，美国 3D Systems 的光固化设备采用的是浸块式液面控制，其原理如图 6.4-6 所示，树脂液面的高低通过步进电机控制浸块在树脂中的浸没长度来控制。液面高度的检测由检测激光和光电传感器组成，检测激光斜射在树脂液面上，液面反射的激光光束打在光电传感器上，当液面高度发生变化时，打在光电传感器上的光点位置也随之变化，光电传感器将位置信号传递给控制电路，控制电路进行计算后给步进电机发送信号控制浸块上升或下降，从而保证液面稳定在固定高度。由于光电传感器的灵敏度很高，所以这种方式控制液面的精度很高，但其不足之处就是液面调整时间长，控制环节容易发生振荡，同时由于精密的光电传感器量程非常有限，所以当液面过低或过高时，检测激光就容易被反射在光电传感器检测范围以外导致没有检测信号。

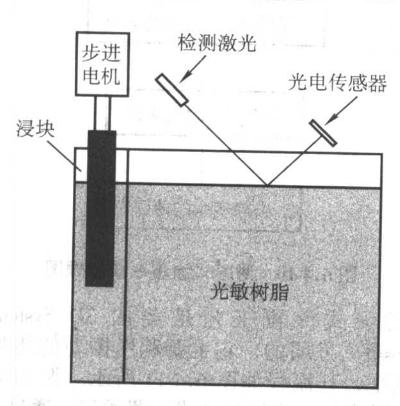


图 6.4-6　浸块式液面控制系统示意图

溢流式液面控制原理如图 6.4-7 所示，树脂通过微型泵不断补充到树脂槽中，当液面高于溢流板缺口时，多余树脂从缺口处溢流，溢流出的树脂通过微型泵重新补充到树脂槽，如此循环即可使树脂液面动态地保持在一定高度。溢流式液面控制结构简单，液面调整简单快速且不存在液面过高的情况，适合于树脂黏度较小，流动性能好的情况。日本 CMET 公司的大部分光固化设备由于其使用的光敏树脂黏度较小，所以液面控制系统采用溢流式方案。由于该方案没有采用液面检测装置，所以不存在反馈振荡的问题。但是由于成形过程中树脂槽的树脂在不断流动着，所以液面会存在一定波动，影响成形质量。为解决这一问题，清华大学激光快速成形中心对溢流式液面控制系统作了一些改进，即在成形槽旁边用隔板隔出了一个溢流槽，溢流槽底部与成形槽连通，补充树脂和溢流都在溢流槽中进行，根据连通器原理，成形槽中的树脂液面与溢流槽中的树脂液面位于同一高度，隔板将溢流产生的波动隔离在溢流槽中，从而避免了对成形质量的影响。

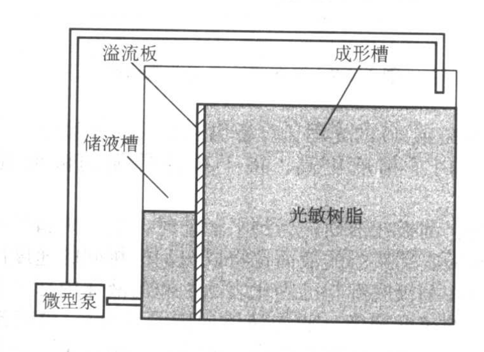


图 6.4-7　溢流式液面控制系统示意图

3）涂覆刮平系统　涂覆刮平系统是大多数光固化成形设备中不可或缺的重要组成部分，尤其是对于采用顶部聚焦法的设备而言，涂覆系统的性能直接影响整个设备的成形精度和成形效率。光固化快速成形工艺发展到现在已经开发出许多各式各样的涂覆方式，例如深沉式（deep dip recoating）涂覆、真空吸附式（zephyr recoating）涂覆、毛细吸附式涂覆、瀑布式涂覆、振动增强式涂覆（vibrationally enhanced recoationg）以及树脂薄膜涂覆（resin film recoating）等，根据树脂补充方式不同可以分为被动式涂覆（passive recoating）工艺、主动式涂覆（active recoating）工艺和其他涂覆工艺三类。

被动式涂覆工艺是指在涂覆过程中，刮板运动的作用在于修平液面，深沉式涂覆和瀑布式涂覆均属被动式涂覆。

瀑布式涂覆工艺是西安交通大学提出的一种涂覆方式，其基本原理如图 6.4-8 所示。当固化完一层后，工作台下降一个层厚的距离，刮板喷头补充已成形表面所需的树脂，控制喷头的流量及移动速度来控制树脂补充量，喷头补充的树脂略多于所需树脂，然后由刮板将多余的树脂（超过所需层厚的树脂）刮走并修平液面。液面的位置是通过液槽上溢流板的高度及刮板的底面位置综合决定的。理想情况下，一层树脂固化完后，工作台下降一个层厚的距离，喷头移动补充所需树脂，然后刮板进行刮平运动，刮走多余树脂，并使液面稳定在刮板底面的位置。

深沉式涂覆是最早出现的一种涂覆工艺，美国 3D Systems 公司早期的 SLA－250 光固化设备采用的就是这种方式。它利用工作台多下降一段距离来使光敏树脂完全浸没已固化表面，然后提升工作台至一定高度，利用刮板将多余树脂刮走。其液面控制由光电传感器来实时检测液面，然后控制树脂中的浸块来调整液面高度。这种方式结构非常简单但涂覆质量和涂覆效率都比较差，涂覆过程中容易产生气泡等缺陷。这种方式所涂覆的树脂层厚与成形零件的几何形状有关，很难达到均匀的涂层，常常导致成形精度的丧失，严重时涂覆过厚的地方会造成刮板与零件的碰撞，破坏已成形零件，引起成形过程中断。美国 3D Systems 公司的 SLA－250/30、

图 6.4-8 瀑布式涂覆工艺原理图

SLA－500/30 或 40 的光固化设备仍然采用这种涂覆工艺，不同的是采用了精度更高、抗干扰性更强的液面检测装置。

但是，刮板在液面进行刮平运动时，由于树脂的粘附作用，与刮板底部接触的液面也将以与刮板相同的速度向前流动，并且在刮板底部与已固化表面之间的液体内部产生线性或非线性的速度梯度（假如液体周围无约束），这将造成刮板底部的部分液体被刮板带走，而导致刮板刮平后液体的实际高度低于刮板底面位置。同时，由于刮板刮走多余的树脂，势必造成刮板前面（刮板前进方向的一侧）树脂的堆积而使刮板前后液面存在高度差，导致刮板前面的树脂向后流动的回流现象，使刮板后面的液面增高。所以，刮板刮过后液面的实际位置由刮板刮平后的剩余量和回流量综合决定，此方法所得液面的位置和涂层厚度是不稳定的。

被动式涂覆工艺的共同特点是刮板中不携带树脂，只起修平液面的作用，树脂补充和刮平运动是分离的，因而其涂覆效率比较低。随着光固化设备向高速高质量的快速制造型设备发展，被动式涂覆工艺逐渐被主动式涂覆工艺所取代。

主动式涂覆工艺是指刮板中携带有一定量的树脂，刮板刮平时同时完成树脂补充和液面修平。真空吸附式涂覆和毛细吸附式涂覆都属于主动式涂覆工艺。

真空吸附式涂覆工艺最早由美国 DTM Somos 公司的 Daniel J. Mickish 发明，此后 3D Systems 公司申请了 Zephyr™ 的专利，它的基本原理如图 6.4-9 所示。刮板由一个一段开口的空腔构成，空腔中抽取一定程度的真空，因而可以吸附一定量的树脂，固化完一层后，刮板刮过已固化零件表面，由于树脂与固化表面间的粘附作用，刮板中的树脂部分沉积在已固化表面完成了树脂补充，同时刮板底面的前后刃口对液面起修平作用。3D Systems 公司后期的光固化设备 SLA－5000、SLA－7000 以及 Viper si2 SLA 等都是采用这种涂覆工艺。这种方式不需要工作台多下降一段距离，其涂覆效率大大提高。但是其整个过程的控制比较复杂，一方面要控制刮板中吸附的树脂量来保证涂层厚度，另一方面还要检测液面并通过其他装置来调整液面，使其稳定在固定的位置上。

吸附式涂覆工艺是另一种主动涂覆工艺，日本 CMET 公司的 SOUP 系列光固化设备大多采用这种方式。它利用树脂的粘附作用和毛细现象，在刮板中储存一定量的树脂，成形过程中固化完一层后，工作台只下降一个层厚的距离，刮板刮平时在已固化表面涂覆上一层厚度均匀的树脂。液面位置由溢流板的高度确定，通过专用的泵不断向树脂槽中补充树脂，多余树脂由溢流板中溢出，从而使树脂动态地保持在固定高度。这种方式对树脂的黏度和流动性有一定要求，由于 CMET 公司采用的光敏树脂黏度很小，流动性好，因此采用这种涂覆方式非常有效。但是如果使用黏度较大的树脂，采用这种方法对于刮板中吸附的树脂量以及刮平时涂覆的树脂

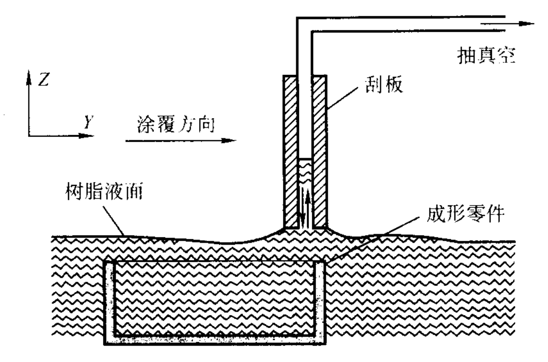


图 6.4-9 真空吸附式涂覆系统原理图

量都很难控制，而且依赖树脂自然流动来维持液面也很困难。

主动式涂覆工艺将树脂补充和液面修平结合在一起，涂覆树脂时工作台只需下降一个层厚的距离，涂覆效率大大提高，因此目前大多数光固化设备都采用这种涂覆方式。但是，除上述的两类涂覆方式外，还有一些特殊的涂覆方式也值得我们注意。其中，树脂薄膜涂覆工艺也是美国 3D Systems 公司的一项专利，由 Adem L. Cohen 发明的，它的主要流程如图 6.4-10 所示。首先利用树脂的表面张力制备很薄的树脂薄膜，然后将树脂薄膜贴在工作台或已固化零件的表面，激光扫描选择性地固化树脂薄膜使其与工作台或已固化零件表面粘结在一起，然后将未固化的树脂薄膜去除掉，重复上述步骤直到固化完所有层片。树脂薄膜涂覆工艺的一个非常突出的优点就是层片厚度由薄膜决定，扫描固化时不存在过固化问题；同时层片厚度通常很小，因而固化时收缩翘曲情况要小得多，而且在成形时就可以将光敏树脂完全固化，避免了后固化过程。但它的缺点也是显而易见的，首先是薄膜的制备其厚度控制非常复杂，而且整个工艺的成形效率也非常低。另一方面，制备大而薄的树脂薄膜非常困难，所以这种工艺只适合于成形一些小型精细零件。

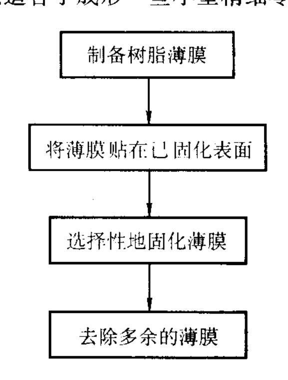


图 6.4-10 薄膜式涂覆系统原理图

振动增强式涂覆工艺是美国 3D Systems 公司的 Paul F. Jacobs 等人发明的，它主要利用振动的能量来加速树脂液面的流平，其流程如图 6.4-11 所示。振动增强式涂覆工艺的基本过程与普通的被动式涂覆类似，通过工作台多下降一段距离或其他方式在已固化表面补充一些多余的树脂，然后工作台上升到指定位置后（使已固化表面与激光焦平面之间为一个层厚的距离），利用针形振子或直接振动工作台使已固化表面多余的树脂迅速流平，然后进行下一层固化。在振动之前也可以采用调整液面或刮板刮平来粗略地将多余树脂刮走。图 6.4-12 为振动工作台的结构示意图。振动增强式涂覆工艺的主要目的是使树脂液面迅速流平从而获得均匀厚度的树脂涂层，采用振动方式而不是用刮板刮平主要是避免刮板破坏已固化表面。这种涂覆方式的结构和控制都比



较复杂，其涂覆效率也不是很高。

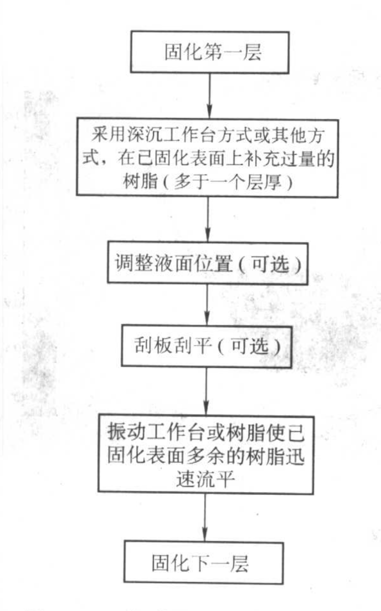


图 6.4-11　振动增强式涂覆系统原理图

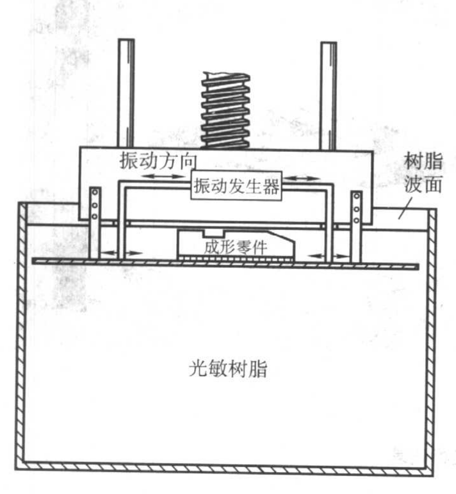


图 6.4-12　振动工作台结构示意图

2.3　扫描振镜的校正

光固化设备的运动机构主要分为两个部分，一是 Z 轴的升降系统，决定了最终零件沿造型方向上的尺寸精度。Z 轴一般采用步进驱动器 + 步进电机的结构；另外一部分是扫描系统，影响成形件在 XY 平面上的尺寸精度。扫描系统一般采用振镜结构，对于每一个具体的应用，需要对振镜系统进行进一步校正才能获得高的定位精度。

由于振镜系统采用的是双镜反射，这样不可避免的在扫描平面上出现枕形误差，为了补偿枕形误差，振镜厂家一般都提供了一个纠错文件，该文件记录了在用户定义的正方形工作空间内 $n \times n$ 个点阵的正确输出坐标。扫描过程中，振镜会自动根据这个点阵插值计算扫描向量每一步差补运动的实际输出值，来纠正枕形误差。但是由于光路系统一个微小的安装误差在最终的扫描结果上都会产生较大的尺寸偏差，为了修正这种机械误差，采用的方法是对纠错文件进一步校正，使其存储的点阵在存在机械误差的情况下仍然是正确的输出值。

日本 Sony's Solid Creation System 公司采取的办法是在工作平面内做九个小正方形，然后测量正方形的尺寸和正方形之间的距离，利用测得的结果校正纠错文件。这种方法测量比较繁琐，容易受到所制作零件精度的影响。清华大学激光快速成形中心结合图像扫描和计算机处理技术采用了一种简便可靠的校正方法：在工作平面内直接标记 $N \times N$ 个栅格点，然后以中心点作为原点，测量其余点的坐标，然后将这些坐标输入振镜厂家提供的校正程序中计算纠错文件。具体的校正过程如下：

1）准备基准平面。由于 SL 设备的工作平面是位于一定高度的液态树脂的自由表面，无法用作测量平台，所以需要另外做一块基准平板。基准平板的大小要与工作平面大小相同或者稍大，平板的上表面需要用磨床进行精密加工，保持很高的平面度，平板上还需要做出三个调整螺钉，用于调整上表面的水平。测量时，平板的水平度保持在 0.05 mm/m。

2）记录光斑位置信息。在工作平面附近，激光光斑的直径一般可以调整到 0.1 mm 左右，采用相纸对光斑位置进行记录。在测量过程中，首先将相纸平整的铺到基准平台上，然后控制扫描系统，标记校正光点。

3）光点的测量。光点位置的测量是整个校正过程中最关键的步骤，直接关系到校正精度。由于点分布在整个工作平面上，台面较大，且要求测量精度高，现有的测量工具很难满足测量要求。此校正方法中利用工业扫描仪进行图像扫描并与计算机处理结合起来解决这个问题。将相纸上的光点阵扫描成 BMP 类型的图片，然后在计算机上对图片上的点进行加深处理，图片中每个光点表现为一组像素的集合，计算每组像素的中心位置作为相应光点对与扫描起始位置的坐标。原始点和加强之后的点的形状如图 6.4-13a、b 所示。

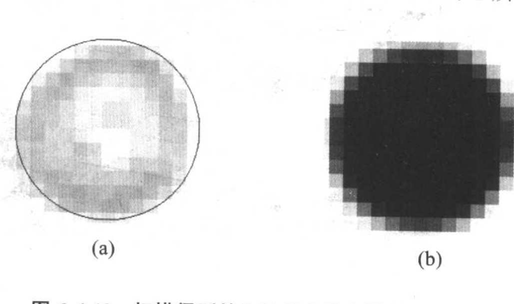


图 6.4-13　扫描得到的原始光点和加强处理后的光点

4）坐标轴拟和与点坐标的计算　最终需要得到的是每个点对于振镜 X/Y 轴的坐标，在计算出各个点的中心位置后，需要计算出 X/Y 坐标轴的位置，并且通过坐标轴的表达式计算出每个点的最终坐标值。坐标轴的拟合公式如式（6.4-6）、式（6.4-7）所示，并且假设原点的位置是正确的。

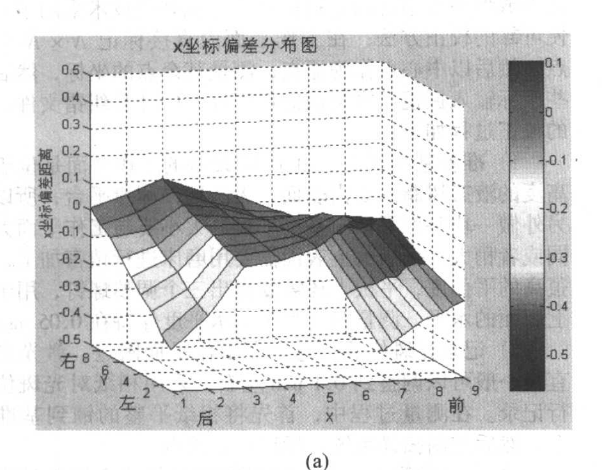
Y 轴的表达式为

$$(x - x_0) - \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_0)(y_i - y_0)}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - y_0)^2}(y - y_0) = 0 \tag{6.4-6}$$

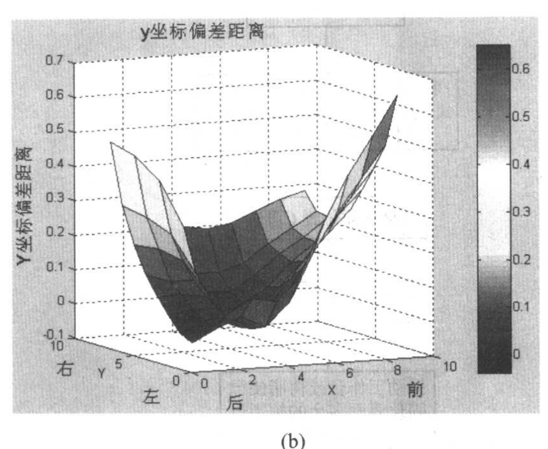
通过垂直关系以及原点坐标，X 轴表达式可以确定为

$$(y - y_0) + \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_0)(y_i - y_0)}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - y_0)^2}(x - x_0) = 0 \tag{6.4-7}$$

图 6.4-14a、b 是校正前工作平面上误差分布图，图 6.4-15a、b 是经过七次校正后的误差分布图，可以看出经过多次迭代校正，整个工作平面上的扫描精度都得到了很大的提高。

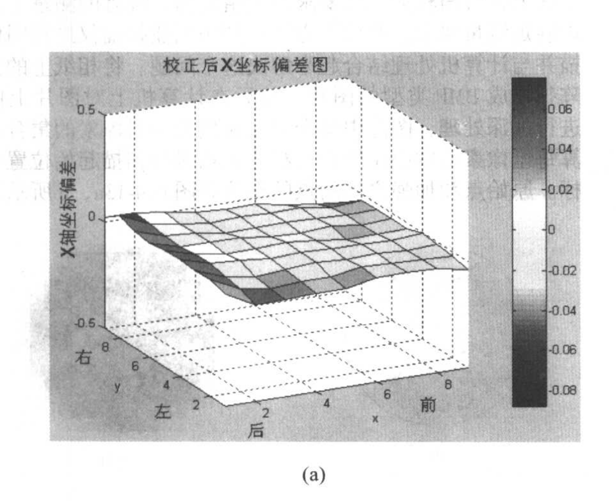


(a)

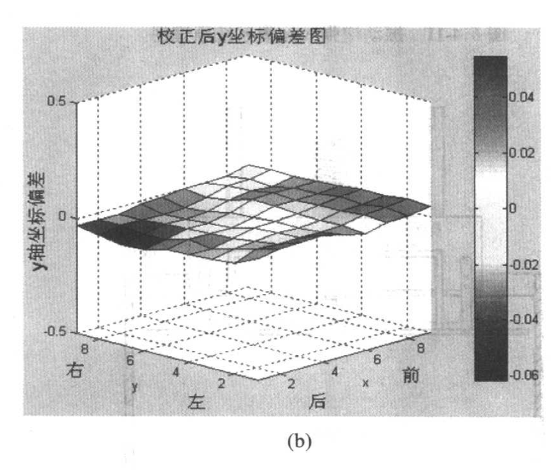


(b)

图 6.4-14 校正前的栅格点 *xy* 坐标偏差



(a)



(b)

图 6.4-15 校正后的栅格点 *xy* 坐标偏差

为了验证校正的结果，采用 3D Systems 公司的标准测试件对成形的精度进行测试，零件放在成形空间的正中心的位置。四个测试边的位置如图 6.4-16 所示，其校正前后的尺寸如表 6.4-2 所示。从表中数据的对比可以看出，经过校正，原型件的成形精度大大提高了。

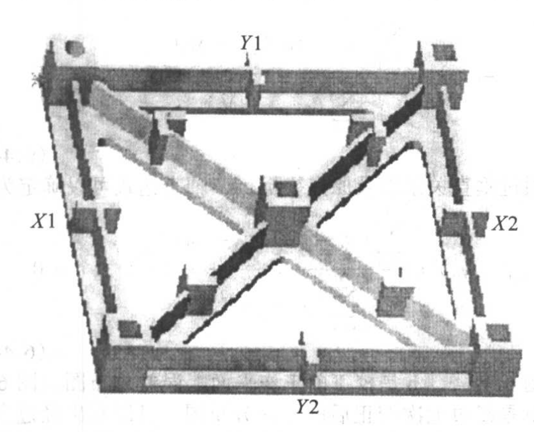


图 6.4-16 标准测试件的测量尺寸示意图

表 6.4-2 校正前后的尺寸结果对比 mm

	X1	X2	枕形误差	最大误差	Y1	Y2	枕形误差	最大误差
修正前	95.13	94.86	0.27	0.14	95.03	94.89	0.14	0.11
修正后	94.97	94.92	0.05	0.08	94.94	94.98	0.04	0.06

利用相纸成像与计算机处理相结合的方法，可以精确的记录激光光斑的形状，找出光斑的几何中心，并且自动拟和出振镜 *X*/*Y* 轴的表达式，进而计算出各个光点相对于该坐标系的坐标。这样使得整个校正过程简便可靠，精度高。

3 光固化快速成形工艺的软件

3.1 数据处理软件

光固化成形工艺数据处理软件中比较独特的一点就是支撑的添加，由于光固化成形工艺采用的光敏树脂成形前为液体，无法形成自支撑，所以成形过程中对于零件的下表面和悬臂部分需要添加必要的支撑结构。



SLA的支撑结构通常由垂直交叉的薄壁网格组成。如图6.4-17所示，薄壁厚度通常为激光光斑直径（0.02～0.10 mm），薄壁间距通常为4～10 mm。此外，支撑通常要插入至零件内部约0.3～1.0 mm，以起到固定零件的作用。

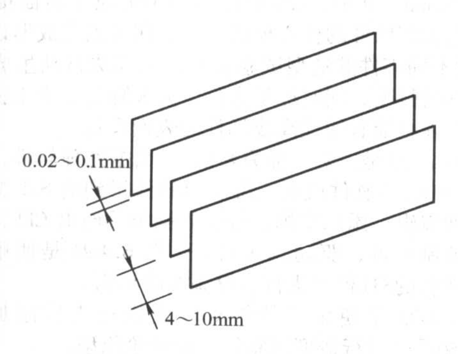


图6.4-17 SLA支撑结构的基本尺寸

SLA支撑必须与原型有一定的重合度才能起到定位的作用，但这同时也使支撑的去除变得困难。因此必须采用一定的措施来提高支撑的可去除性，如筛选待支撑区域、加大支撑网格的间距、减小支撑的插入量、采用齿形支撑等。

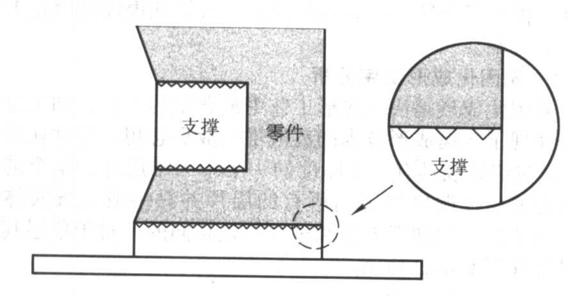


图6.4-18 齿形支撑结构

齿形支撑结构在顶部和底部皆为锯齿状，很容易被剥离，能大大提高成形件的表面质量。齿间的空隙也便于造型过程中液态树脂的流动。图6.4-18为齿形支撑结构的示意图。为了避免支撑陷入加工平台的圆孔中，在支撑与加工平台的接触处并没有添加齿形。

清华大学激光快速成形中心在开发光固化成形设备Auro－350时提出并实现了一种新的齿形支撑算法，它是基于从“三维实体→支撑面→支撑线→支撑点”的离散降维思想，最终由支撑点直接生成所需的齿形支撑结构。在计算过程中建立并利用了三角面片之间的拓扑关系，大大提高了算法的计算效率。

齿形支撑算法的系统框架图如6.4-19所示。首先，系统读入零件的STL文件和用户指定的支撑参数，生成包含拓扑信息的顶点二叉树和面片数组。然后扫描全部三角面片，按一定准则提取需要添加支撑的面片，并将其中相邻面片合并成“待支撑面”。对每个待支撑面在 x 和 y 方向上以一定间距划分网格，生成“支撑线”，同时计算包含这些支撑线的垂直截面轮廓。在每条支撑线上插入等间距的“支撑点”，过这些支撑点作平行于 z 轴的射线。计算射线和相应垂直截面的交点，将这些交点进行 z 向偏置后形成所需的网状齿形支撑。如果待支撑面有相邻的垂直壁，则生成三角片状支撑(gusset)取代网状支撑。如果待支撑面属于狭长区域，为了加固网状支撑，沿着待支撑面的轮廓线加上轮廓支撑。最后，系统输出支撑结构的STL模型。

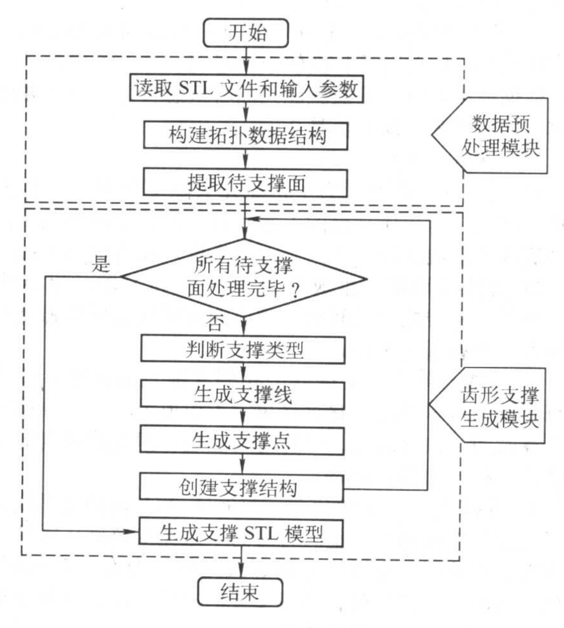


图6.4-19 齿形支撑生成算法的系统框架图

Aurora 1.0中设置的相关参数可以分为两大类：支撑选择参数和支撑生成参数。系统首先根据前者选择待支撑的区域，再根据后者为每个待支撑区域生成相应的支撑。每个支撑参数有一个缺省值，使用缺省值可以生成一个系统默认的“标准的”支撑结构。但更多的时候需要用户根据具体的情况指定一个更为合理的值。参数的选择与所使用的机器、树脂材料、激光功率以及所加工零件的具体特征有关。通常对于某一种型号的SLA设备，都有一套与之匹配的缺省参数。这些参数都是通过反复的实验而最终确定下来。图6.4-20说明了部分主要的支撑参数的意义。

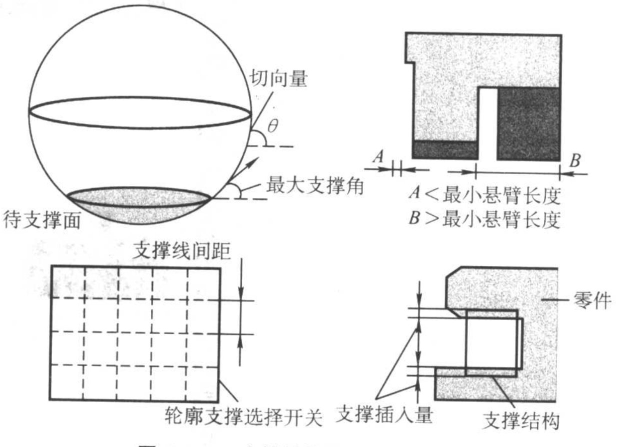


图6.4-20 支撑结构的部分相关参数

(1) 支撑选择参数

1) 最大支撑角 水平或者近似水平的面片需要添加支撑；而垂直或者近似垂直的面片由于相邻层片之间的悬臂长度较小，不需要添加支撑。如果一个三角面片和水平面的夹角小于最大支撑角，则被选为待支撑面片；反之被视为“自支撑面片”，而不需要支撑。缺省值是30°。

2) 最小支撑面积 通常小面积区域并不需要支撑。此外，通过三维扫描等途径得到的STL文件中往往存在着大量的“噪声”。为了将这些“噪声”从待支撑面中剔除，我们为待支撑面设定一个面积阈值，只有面积大于该阈值的区域

才被选为待支撑面。缺省值是1 mm^2。

3）最小悬臂长度　垂直壁能对它上方的表面起到一定的支撑作用。因此对于长度较小的悬臂，并不需要额外的支撑。根据最小悬臂长度值就能判断哪些悬臂可以不需要添加支撑而加工出来。缺省值是 2 mm。

（2）支撑生成参数

1）最小支撑高度　为了避免在去除支撑时对零件造成破坏，以及消除工作平台的不水平对造型精度的影响，位于零件底部的基础支撑必须大于一定高度。缺省值是 5 mm。

2）支撑线间距　生成平行于 *X* 轴和 *Y* 轴的网状支撑时，相邻支撑线之间的间距。该值同时影响支撑的强度和可去除性。缺省值是 8 mm。

3）支撑点间距　支撑线上相邻支撑点的间距。该值是计算支撑的基本单位，它直接决定了齿形大小、支撑精度以及计算时间。该值越大，计算时间越短，但支撑精度会相应地降低。缺省值是1.5 mm。

4）支撑线 *X*/*Y* 向缩进量　平行于 *X*/*Y* 轴的支撑线相对于待支撑面轮廓的缩进量。有时为了避免支撑破坏零件的拐角或者轮廓特征，支撑线与轮廓线之间需要有一定的间隙。该值为负时，支撑线延长到待支撑面之外，此时有利于提高小面积支撑的强度。缺省值是 0 mm。

5）支撑插入量　在 SL 工艺中，由于工作台的运动和树脂的浮力会使零件产生漂移，支撑需要插入到零件内部。用户可以分别指定支撑顶部和底部的插入量。如果支撑的底部位于工作平台上，该值自动无效。缺省值是0.3 mm。

6）内/外轮廓支撑选择开关　较高的支撑或者狭长状支撑在造型过程中不稳定，很容易被刮板的运动所破坏，需要添加轮廓支撑进行加固。用户可以分别选择是否添加内、外轮廓支撑。缺省值是 FALSE。

7）轮廓支撑偏置量　轮廓支撑相对于待支撑面轮廓的偏置量。内轮廓向外偏置，外轮廓向内偏置。缺省值是 0.3 mm。

8）齿形选择开关　在支撑的顶部和底部生成锯齿，提高支撑的可去除性。通过该开关可以选择是否添加锯齿。缺省值是 TRUE。

在 Aurora 1.0 中，使用VC++6.0实现了前面提出的算法，并用作该软件的核心模块之一。在光固化成形设备 Auro 350 上对不同零件的造型试验表明，该算法自动生成的支撑具有足够的强度，同时极易去除，大大降低了手工去除支撑的难度，并且能有效提高成形件的表面质量。

Aurora 1.0 是一套功能完整的 SL 数据处理软件，输入数据是从CAD造型软件或者三维反求软件得到的 STL 文件，经过一系列编辑、添加支撑、分层等操作后输出 CLI 文件直接传送至控制软件，驱动 SLA 设备。图 6.4-21 是使用该软件对壶和叶轮的STL模型进行支撑添加的界面。

图6.4-22 是使用该软件对叶轮进行支撑添加后，由 Auro-350设备进行造型试验得到的叶轮原型。

3.2　成形控制软件

对于不同的快速成形工艺，成形控制软件具有一定的共同点，这些在第 3 章中已有叙述。对于光固化工艺而言，成形控制软件直接影响零件的成形效率和成形质量，清华大学激光快速成形中心针对牙颌等小型零件的光固化成形进行了研究，提出了分区并行处理的概念，有效地提高光固化工艺的成形效率。

3.2.1　光固化成形工序分析

光固化成形是快速成形工艺中最典型的工艺，加工过程充分体现了快速成形技术的离散堆积成形思想。零件在沿着 *z* 方向被切分成具有一定厚度的一个个二维层片，整个的成形过程就是按顺序加工出所有的层片并黏结成三维实体零件。每个层片的加工方法和过程都是相同的，对于单层其工艺过程如图 6.4-23 所示。

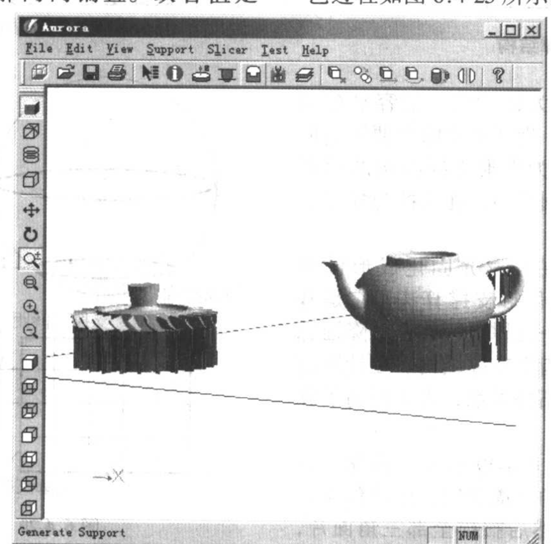
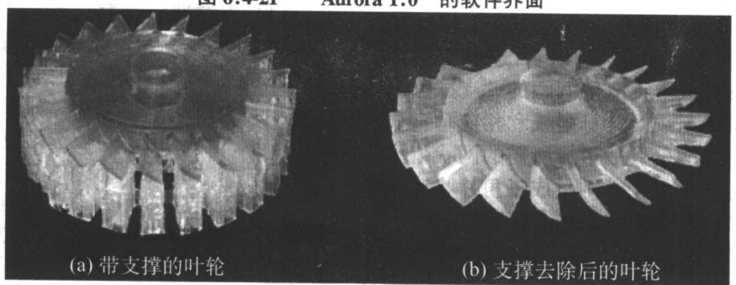


图 6.4-21　“Aurora 1.0”的软件界面



(a) 带支撑的叶轮　　(b) 支撑去除后的叶轮

图 6.4-22　叶轮造型试验



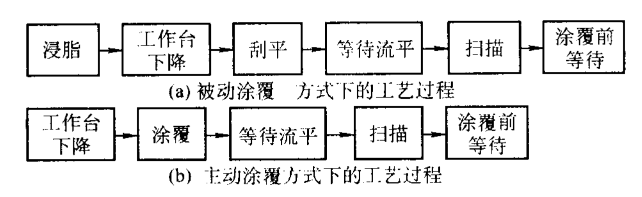


图 6.4-23 光固化单层加工过程

其中图 6.4-23a 是采用被动涂覆方式的工艺过程，图 6.4-23b 是采用主动涂覆方式的工艺过程。Auro－350采用的是主动涂覆方式。

在单层的加工过程中，两种工艺过程都必须首先进行涂覆操作，获得一个层厚的液态树脂，然后等待液态树脂表面流平，接下来才能进行截面的扫描，扫描之后需要等待一段时间才能进行下一层的涂覆操作，以使刚刚固化的部分能够获得一定的强度。可以看到无论是主动涂覆方式还是被动涂覆方式，每个工艺步骤在整个工艺过程中的位置是确定不变的，当前工艺步骤的完成是下一个工艺步骤可以进行的必要条件，也就是说光固化中各个工艺步骤之间是严格操作顺序的串行过程。

从上述的分析中也可以看出，提高成形效率的方法可以分为两类：一是优化工艺参数，缩短各个工艺步骤的执行时间，二是采用并行处理的机制合理安排各工艺步骤的执行顺序。第一类方法包括提高激光功率以提高扫描速度、改进涂覆工艺等，这些方法在一定范围内可以提高成形效率，但往往要增加成本。分区并行方法属于第二类方法，是在各个工艺步骤的成形效率已经进行优化的基础上对工序进行合理的安排，从而提高整个成形过程的成形效率。

考察主动涂覆方式下，各个主要环节资源的利用情况，如表 6.4-3 所示。

表 6.4-3 传统光固化中资源利用情况

资源/工步	工作台下降	涂覆	等待流平	扫描	浸脂前等待
工作台	工作	闲置	闲置	闲置	闲置
涂覆系统	闲置	工作	闲置	闲置	闲置
振镜	闲置	闲置	闲置	工作	闲置

从表 6.4-3 可以看出，在造型过程中，资源的利用情况并不是很好，每种系统资源在大多数工步下是闲置的，这是由加工过程的工艺步骤严格串行顺序所决定的。其中扫描操作是成形的核心步骤，定义为主步骤，其他步骤都可以看成是扫描操作的辅助，定义为辅助步骤。因此对串行工艺过程进行合理改造，使多个工艺过程同时进行处理来提高扫描操作在整个加工过程中的利用率是提高整体加工效率的关键。

在实际的系统中，每个工艺步骤完成所需要的时间是不同的，甚至相差很大，并且有可能单个工步完成所需要的时间是不断变化的，这为任务的合理分解制造了一定的困难。下面以牙颌成形为例对光固化成形的分区并行处理方法进行分析，表 6.4-4 是主动涂覆方式下 10 个牙颌同时成形各个工艺步骤消耗的时间的统计。

表 6.4-4 光固化各工艺步骤耗时统计

工步	工作台下降	涂覆	等待流平	扫描	涂覆前等待
时间/s	小于 1	8～13	10	1～92	15

其中工作台下降的时间几乎可以忽略，涂覆、等待流平和涂敷前等待的时间基本上在一个量级上，而一般情况下扫描的时间最长。而且涂覆和扫描的时间是动态变化的值，它们是与当前层的截面面积和形状相关的，对涂覆而言，单独的区域面积越大，涂覆速度越慢，涂覆时间越长；在涂覆方向上零件分布越分散，涂覆距离越大，涂覆时间越长。对扫描而言，在激光功率和造型方式确定的情况下，基本上扫描时间与扫描面积成正比，在牙颌底部扫描面积大，耗时长，在牙冠顶部，扫描面积小，耗时短，扫描时间最长的时候比其它所有工艺步骤耗时的总和还要大。

显然如果按照工艺步骤进行流水线并行操作是不切实际的。为此根据牙颌的成形特点提出分区流水线并行操作的方法。扫描操作是主要操作，也占据了大部分成形时间，其他操作是辅助操作，所以在工艺进程上把原来的五个步骤分组成两个子过程，即扫描操作为一个子过程，称为扫描子过程，涂覆前等待、工作台下降、涂覆、等待流平四个工艺步骤作为一个子过程，成为涂覆子过程。相应的牙颌平均分成两组，成形空间上也分成两个相等的区域，在一个区域进行扫描子过程的同时，另外一个区域进行涂覆子过程，两个区域之间呈流水线式的交替并行加工。对于任何一个区域的牙颌来说，其加工过程的严格串行顺序并没有改变，但是在成形过程中，两个区域的牙颌能在相同的时刻交替利用系统的不同资源，提高了资源的有效利用率，因此能够提高加工的效率。流水线式分区并行处理的基本过程如图 6.4-24 所示。

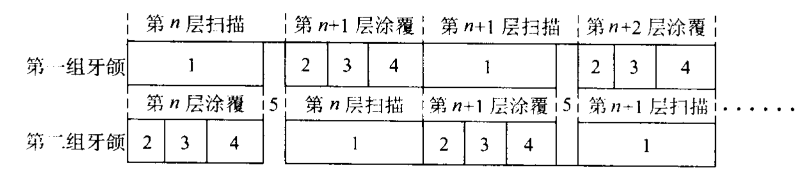


图 6.4-24 流水线式分区并行处理

1—截面扫描；2—涂覆前等待；3—涂覆；4—等待流平；5—工作台下降一个层厚

从图 6.4-24 可以看出两组牙颌的成形过程基本遵循了串行操作的过程，但是对于第二组牙颌将扫描截面后的工作台下降操作移到了扫描之前进行，由此而产生的问题及解决办法将在 3.2.2 节中讨论。在相同时刻每组牙颌对于系统资源的占用是不同的，当第一组牙颌开始第 n 层的扫描操作时，其开始完全占有扫描系统的资源，对于 10 个牙颌同时成形来说，单组（5 个牙颌）的扫描时间在基本在50 s之内。与此同时第二组牙颌开始进行第 n 层的辅助操作，即涂覆前等待、涂覆、等待流平，涂覆系统资源被占用，辅助过程的完成基本在35 s之内。当第一组的扫描操作、第二组的辅助操作完成时，扫描系统资源和涂覆系统资源被交还给控制系统，接下来控制系统进行同步，然后工作台下降一个层厚

的距离。第一组申请并占用涂覆系统资源，进行第 $n+1$ 层的涂覆操作，第二组申请并占用扫描系统资源，进行第 n 层的扫描操作。如此不断反复交替进行，完成全部牙颌的成形。

3.2.2 流水线式分区并行处理中的技术问题

如3.2.1所述，第二组牙颌在扫描开始之前，工作台已经下降了一个层厚的距离，并因此而引发一些问题，如果这些问题得不到解决，第二组牙颌的成形质量是无法得到保证的。下面对因此而引发的各种问题进行讨论并给出解决的办法，实际的加工结果也证明了这些问题得到了有效的解决。

（1）焦点直径的变化

在Auro－350系统中当紫外激光通过扫描系统的动态聚焦之后就开始进行聚焦的过程，动态聚焦能够保证焦平面总是落在与振镜扫描系统的 Z 方向垂直的一个平面内，一般情况下，将焦平面和工作平面设在同一位置。对于Auro－350来说，由于造型方式以及成形效率需要适当放大扫描光束直径，因此工作平面实际上和焦平面之间有一段距离，并且从前面的分析已经知道，沿光束传播方向上工作平面处的光束直径是基本不变的。液态树脂在固化过程中等效焦点为扫描光束在工作平面上的投影，在工作平面内不同的位置上，由于激光入射角度的不同，投影形状会发生变化，也就是在工作平面上的不同位置等效焦点的形状是不同的。因此引起焦点大小变化的因素除了分区并行处理中的工作平面偏移外还有入射角度的不同，下面对这两种情况焦点的变化量进行计算。

1）入射角度引起的焦点变化　对于高斯分布的基模激光，当入射角度垂直时投影形状为圆形，而存在偏角时，投影形状变为椭圆形，椭圆的短轴与垂直入射时光斑直径相等，长轴随偏转角度不同而变化，偏转的角度越大椭圆的长轴越长，投影面积也越大，如图6.4-25所示。设光束与竖直方向的夹角为 θ，工作平面处光束直径大小为 D，根据直角三角形关系可以得到投影椭圆长轴 d 的计算公式：

$$d = D/\cos\theta \qquad (6.4\text{-}8)$$

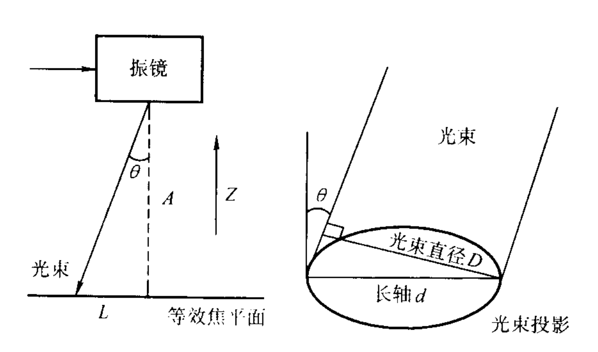


图6.4-25　等效椭圆焦点的长轴计算

其中 θ 可以通过工作距离 A，偏离距离 L 来求得，$\theta = \arctan(L/A)$，因此等效焦点的长轴与偏移距离关系的表达式为

$$d = D\frac{\sqrt{A^2 + L^2}}{A} \qquad (6.4\text{-}9)$$

对于Auro－350系统，最大工作工作空间为350 mm × 350 mm，偏移距离 L 的最大值为 $L_{max} = 175 \times 21/2 = 247.5$ mm，振镜偏转镜与工作平面之间的工作距离 A 为610 mm，因此可通过公式计算得到长轴的最大增量百分比为7.9%，当系统的设定焦点为0.1 mm时，则工作平面的四个角点，等效焦点的长轴大小为 $d = 0.107\,9$ mm，长度增加0.007 9 mm。通过公式可以知道，由于扫描位置不同而引起的焦点长轴变化与扫描点的偏移位置之间是成非线性的关系的，同时由于变化量相对较小，在成形过程中不对等效焦点的变化进行补偿。

2）工作台下降引起的焦点变化　当入射角度变大会引起等效焦点直径相应增加，而在流水线式牙颌分区并行处理中，当工作台下降一个层厚的距离后，会引起等效焦点直径变小。这是由于Auro－350系统的焦平面位置要比工作平面低一些，工作台下降后，工作平面更接近焦平面了。图6.4-26是高斯光束的聚焦示意图。其中在焦点处光斑直径为 $2w(0)$，沿光束的传播方向离开一定的距离 z 后，光斑直径变为 $2w(z)$，$w(z)$ 可以通过下式求得：

$$w(z) = w_0\left[1 + \left(\frac{z\lambda M^2}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^{1/2} \qquad (6.4\text{-}10)$$

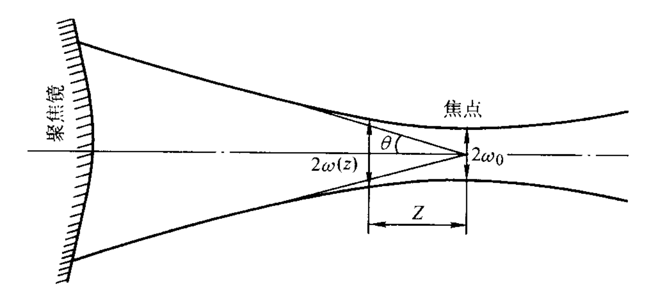


图6.4-26　高斯光束聚焦示意图

另外有远场发散角 θ（半角）的表达式为

$$\theta = \frac{\lambda M^2}{\pi w_0}$$

因此 $w(z)$ 可以改写为

$$w(z) = w_0\left[1 + \left(\frac{z\theta}{w_0}\right)^2\right]^{1/2}$$

对上式取导数可以得到光斑半径随传播距离的变化率：

$$w'(z) = \frac{\theta}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{w_0}{z\theta}\right)^2}} < \theta$$

可见光斑直径的变化率总是小于远场发散角 θ 的，当工作台偏移 ΔL 时，光斑直径的变化 ΔD 可以通过发散角来估算：

$$\Delta D < 2\Delta L\theta \qquad (6.4\text{-}11)$$

当工作台偏离0.2 mm时，可计算得到光斑直径的变化量为不超过0.002 38 mm（远场发散角（半角）的大小为5.96mrad）。当等效光斑直径为0.1 mm时，变化的百分比不超过2.4%，可见由于工作台下降而引起等效焦点直径的变化量比入射角度变化而引起的变化量小的多，而且绝对变化量在几个微米，远小于系统精度，所以对焦点直径的变化可以不用考虑。

（2）扫描向量变化问题

工作台下降引起的另外一个问题是，扫描向量的位置和大小会发生变化，如图6.4-27所示。初始扫描向量为 L，当工作台从位置 P 移动到 P' 后，实际扫描出来的向量变成了 L'，从图上的几何相似关系可知，向量长度的变化是线性放大，变化体现在端点位置的移动上，不同位置的点，偏移量是不同的。下面我们通过几何相似关系推导不同位置的点由于工作平面偏移而引起坐标位置变化量的计算公式，以 X 轴方向的坐标变化量为例进行计算。工作台在正常位置的时候，扫描点为 V 点，当工作台下降 Δa 后，扫描点变为 $V1$ 点。V' 为点 V 在新位置的正投影，坐标偏移量为 ΔX。

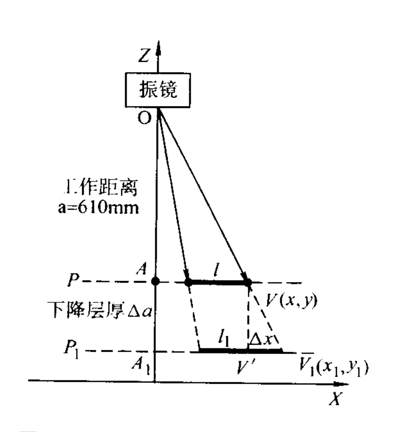


图 6.4-27 工作台偏移引起的向量变化

从三角形 OAV 与 $OA'V'$ 的相似关系有

$$\frac{OA}{OA_1} = \frac{AV}{AV_1}$$

即

$$\frac{a}{a+\Delta a} = \frac{x}{x_1} = \frac{x}{x+\Delta x}$$

可以得到 x 坐标偏移量为

$$\Delta x = \frac{x}{a}\Delta a$$

从此公式可知坐标偏移量与坐标值和下降距离成正比，与工作距离成反比，假设工作台下降 0.2 mm，X 轴的最大坐标值为 175 mm，带人公式计算可以得到最大偏移量 $\Delta_{xmax} = 0.057$ mm，而造型精度要求在 0.1 mm 之内，所以这个偏移量不能被忽略，需要对第二组牙颌中的扫描向量的端点进行修正。设当修正后的 X 扫描坐标为 x' 时，在工作台新位置得到的实际光点坐标才 x，对相似公式变形可以得到 x' 的表达式为

$$x' = \frac{a}{a+\Delta a}x \tag{6.4-12}$$

同样可以得到 Y 坐标的修正表达式

$$y' = \frac{a}{a+\Delta a}y \tag{6.4-13}$$

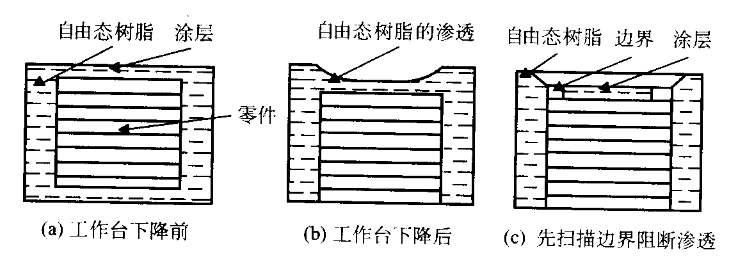
（3）液面平衡问题

激光固化扫描所处理的对象是涂覆在已成形零件表面的一层薄薄的液态树脂，在扫描过程中，这层树脂的上表面要和成形腔中其他液态树脂的自由表面保持平齐，但是从上一节的分组成形过程我们知道，第二组牙颌在扫描之前工作台已经下降了一个层厚的距离，就是说涂覆树脂的上表面比其它液态树脂的上表面低了一个层厚的位置，并由此会引发自由态树脂不断向涂层渗透的情况，如图 6.4-28 所示。

在渗透作用下，涂层的边缘的厚度介于一个层厚到两个层厚之间，随着造型的不断进行，成形的表面不再是一个平面，而变成了类似碗状的凹面。为了解决树脂的渗透问题，我们需要截断自由态树脂与涂层之间的联系，解决的办法是在工作台下降之前，首先对成形截面的边界进行扫描，在自由态树脂和涂层之间形成一条固态隔离层，当工作台下降之后，依靠液态树脂的表面张力阻止渗透的发生，如图 6.4-28c 所示。

因此需要对造型的工艺工程进行进一步的修正，将每个截面的扫描过程分成两个部分：边界扫描和填充线扫描。改进后的工艺过程图 6.4-29 所示：

扫描过程中的主要时间消耗在填充线的扫描上，对于 10 个牙颌来说，轮廓线的扫描大约在 3～5 s 之内，因此第二组牙颌的边界扫描以及工作台下降的操作一般情况下可以在第一组牙颌的涂敷前等待的时间内完成。



(a) 工作台下降前　(b) 工作台下降后　(c) 先扫描边界阻断渗透

图 6.4-28 渗透对涂层的破坏及解决

	第 n 层扫描	第 n+1 层涂敷	第 n+1 层扫描	第 n+2 层涂覆	
第一组牙颌	1, 2	3, 4, 5	1, 2	3, 4, 5	
	第 n 层涂覆	第 n 层扫描	第 n+2 层涂覆	第 n+1 层扫描	
第二组牙颌	3, 4, 5	1, 6, 2	3, 4, 5	1, 6, 2	……

图 6.4-29 改进的分区并行处理过程

1—轮廓扫描；2—填充线扫描；3—涂覆前等待；4—涂覆；5—等待流平；6—工作台下降一个层厚

3.2.3 分区并行处理中系统匹配

光固化的硬件控制结构一般采用主控系统（工控机）加控制子系统的结构，其中主控系统完成人机交互介面以及模型文件到控制任务的生成、控制，而每个子系统在主控系统的控制下具体执行一种或多种控制任务，比如扫描子系统控制激光器和振镜协同工作完成截面扫描，涂覆子系统执行涂敷任务，工作台子系统负责工作台的升降和定位。实行分区并行处理，在相同时刻会有两个或两个以上的子系统同时进行工作，这一方面会产生子系统之间如何进行协调同步的问题，另一方面会产生系统如何占用、共享主控系统资源以及硬件干涉的问题。并行的子系统之间必须合理的共享应用系统有限的软硬件资源和空间资源。

（1）分区并行处理子系统的匹配

对于主控系统，相当于一个恒流源，而子系统相当于恒流源的负载，恒流源流出的是主控系统的软硬件资源。在任意时刻恒流源的输出能力是固定不变的，在串行工作方式下，每个子系统能在不同的时刻独占方式的享有这些资源 I_s，如图 6.4-30a 所示，因此对子系统的独立处理能力要求较低。

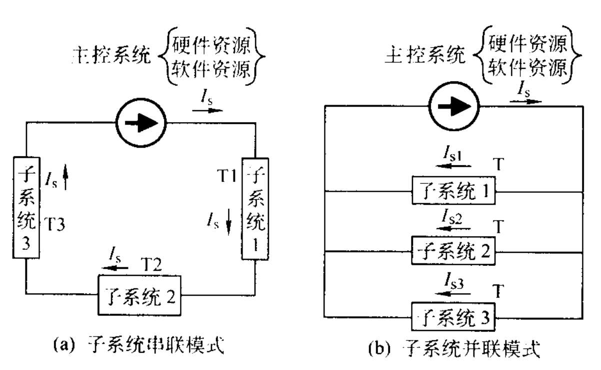


图 6.4-30 子系统与主控系统间的关系

但是对于并行方式，如图 6.4-30b，多个子系统同时工作时，资源从独享方式变成了共享方式，每个子系统只能得到部分资源，其中资源分配符合电流守恒定律。

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} \tag{6.4-14}$$

此时如果子系统的运行都强烈依赖主控系统的资源，一方面会造成子系统任务由于资源不足而严重阻塞，另一方面整个系统的控制能力急剧下降，甚至系统瘫痪。也就是说对于子系统而言，它还必须拥有自己独立的"电源"，以使其的正常运行不致于消耗太多的系统资源。具体的就是子系统在从主控系统领取一定的任务后必须能够存储任务数据、独立的进行任务的运算、控制和监测，这样才能适应并行处理的要求。

对于 Auro－350，主控系统是工业计算机以及光固化控制软件，子系统包括扫描子系统、涂覆子系统和工作台系统，这些子系统能否独立进行任务处理是我们分组并行处理能否顺利进行的关键。

1）扫描子系统　在多牙颌的成形过程中，扫描子系统的处理时间占据了整个成形时间的大部分，和主控系统之间的数据交换也最多，是系统的主要负载。扫描过程中的主要操作有，焦点位置动态调整、位置纠错补偿、跳转、激光开、扫描、激光关等几种操作，其中焦点调整、跳转、扫描都需要大量的计算工作。扫描系统提供了具有独立处理能力的控制卡－RTC3。RTC3 本身带有一块快速数字信号处理器（digital signal processor，DSP）和一个能存储 8 000 条命令的命令缓冲区，通过 PCI 插槽与主控计算机相连，获取各种命令及数据并且存储在自己的缓冲区内，然后利用卡上的 DSP 对数据进行相应的运算后实时控制扫描头、动态聚焦和激光器的开关。扫描过程中的细节完全不需要主控计算机的干涉，与主控计算机的交互仅仅是得到操作的命令列表，而这个时间占用和主控系统的性能相关，一般情况下是非常短的，比如对于 Auro－350 系统，主控系统向扫描子系统发送 1 000 条跳转命令和 1 000 条扫描命令的时间不超过 60 ms，这与扫描系统执行完毕这两千条指令的时间比较起来几乎是可以忽略不计的。所以对于扫描子系统而言在造型过程中对主控系统的资源占用是非常有限的，完全可以看作是独立的模块，适合并行处理的需求。

2）涂覆子系统　在分组并行处理中，当工作台运动的时候由于工艺的要求其他操作需要暂停，与扫描过程并行的是涂覆子过程。涂覆子过程相对来说是一个比较简单的操作，其中的涂覆前等待和等待流平两个步骤不需要系统进行任何动作，要进行控制的只是涂覆一个步骤。对于涂覆系统和工作台系统采用的都是数控卡加步进驱动器、步进电机的结构。数控卡是涂覆和工作台系统的核心部件，系统采用的是格里奥公司的 DMC－1842 数控卡，该卡带有一块 32 位的 Motorola 68331 系列微处理器、2M 的随即储存器和 2M 的闪存只读存储器。数控卡通过 PCI 插槽与主控计算机相连，并且映射到主控计算机的 I/O 地址空间。对于涂覆操作，主控计算机只是需要将命令发送到数控卡的输入缓冲区就可以了，而这个过程所消耗的时间在毫秒级别以下，数控卡依靠自身的微处理器自动完成涂覆过程的控制。因此涂覆系统也是可以满足并行处理要求的。

综上所述，对 Auro－350 的控制系统，各个子系统之间对主控系统资源的占用是有限的，也就是主控系统可以带动子系统同时并行工作。

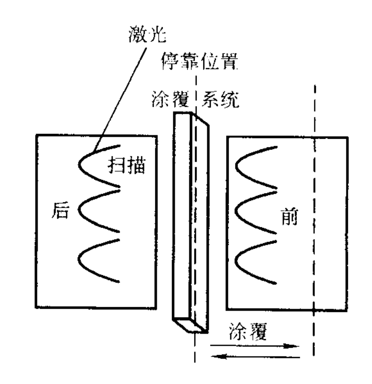


图 6.4-31 分区并行处理中的涂覆过程

（2）分区并行处理空间的匹配

实行并行处理，另外一个不容忽视的问题是机械干涉问题，对于光固化是在有限成形空间内成形的，各个子系统不仅要共享软硬件资源，还要共享空间资源。对于我们的分区并行处理，具体的体现就是在扫描和涂覆并行进行的过程中，涂覆系统是否会对扫描光路产生影响。图 6.4-31 是进行分区处理的涂覆示意图。

牙颌的成形区域被分成前后两部分，中间留有 30 mm 的涂覆系统停靠区，如图上所示，当对"后组"牙颌扫描的过程中，需要对"前组"牙颌进行涂覆，从涂覆的路线上可以看到对"后组"牙颌的成形光路没有任何影响，涂覆完成后，涂覆系统停在停靠位置待命；同样对"前组"牙颌的扫描和对"后组"牙颌的涂覆也不会产生任何干涉。因此从成形空间来看，采用分区并行处理并行子系统之间也不会产生机械上和光路上的干涉。

3.2.4 分区并行处理的效率分析

（1）串行到并行的效率分析

流水线式分区并行处理将加工区域分解成若干子区域，实现多个工艺子过程在不同子区域的同时处理，相对串行过程而言可以加快工艺进程，提高工艺效率。假设采用串行处理消耗的时间为 T_s，采用并行处理消耗的时间为 T_p，可以将效率提高率 $\Delta\eta$ 定义为

$$\Delta\eta = \frac{T_s - T_p}{T_s} \times 100\% \tag{6.4-15}$$

对于一个由多工步组成的串行过程，如果每个工步消耗的时间 T_e 是相同的，我们定义这样一个过程为对称的过程。对于 n 工步的对称串行过程，实行分区并行处理时，需要把加工区域分解为 n 个子区域，各个工步按照流水顺序对各个子区域同时加工。串行加工和并行加工的过程如图 6.4-32 所示。

可以看到在串行方式下，一个工艺循环的耗时是所有子过程的和，即

$$T_s = \sum_{i=1}^{n} T_{ei} = nT_e \tag{6.4-16}$$

在并行方式下，一个工艺循环的耗时实际上就是一个工



步的耗时，即 T_e。所以对对称的过程的效率的提高率为

$$\Delta\eta = \frac{nT_e - T_e}{nT_e} = \frac{n-1}{n} \tag{6.4-17}$$

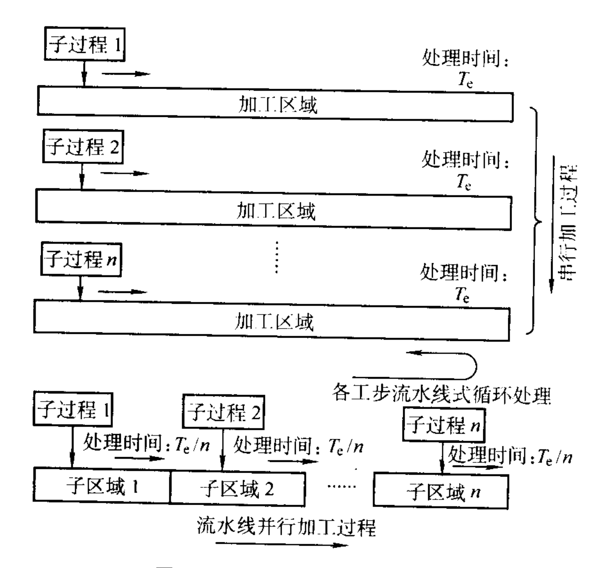


图 6.4-32 串行和并行加工过程

对称过程采用分区并行处理后，所有工步都消除了等待的状态变成全时工作，其利用率全部达到 100%，而在实际的工艺中，对称的过程是非常少的，各个工步之间耗时总会有一定差距，甚至相差很大，比如在我们的多牙颌成形中，有时扫描工步的耗时就要比其他所有工步的耗时总和还要大，这种情况下采用分区并行处理就不能保证所有的工步的利用率全部提高到 100%。n 工步的非对成过程在分区并行处理中可以将加工区域等分成 n 个子区域，也可以将一些耗时较少的工步合并成一个工步以使总的工步数变为 m（$m < n$），从而将加工区域等分成 m 个子区域，其中工步合并的规则是，合并工步的总耗时小于最大的单工步耗时。

非对称过程串行方式下一个工艺循环的耗时与对称过程是相同的，而分区并行处理中，无论是分解成 n 个子区域还是 m 个子区域，从并行处理的过程中可以看出所消耗的时间是耗时最大的工步的处理时间，即

$$T_p = \max(T_{ei}) \tag{6.4-18}$$

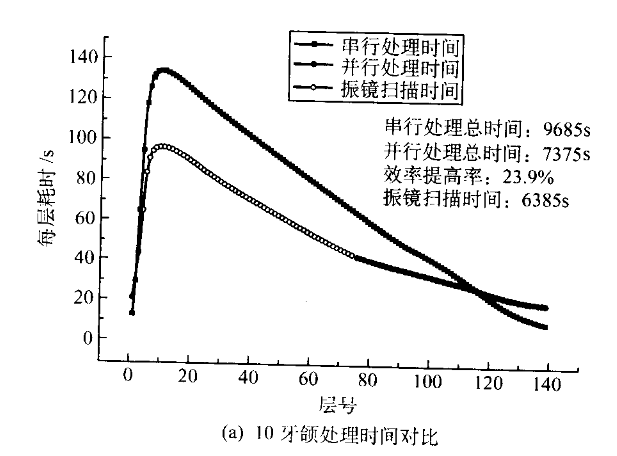
因此非对称过程分区并行处理效率提高的最大值可以由下式得出：

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{ei} - \max(T_{ei})}{\sum_{i=1}^{n} T_{ei}} \tag{6.4-19}$$

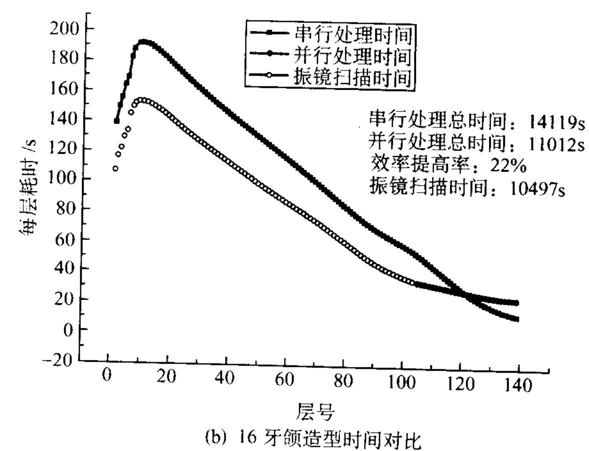
从上面的分析可以看出，无论是串行方式下还是并行方式下，每个工步都必须对所有的加工区域进行遍历。对于串行方式，单工步的利用率肯定小于 100%，对并行方式，当过程对称时，所有工步可以同时达到最大利用率，当过程为非对称时，只有耗时最大工步的利用率才可能达到 100%，其他工步耗时越短，利用率越低。当任意一个工步的利用率达到 100%后，整体效率的提高就达到了理论上的极限值。对于多牙颌的分区并行处理，振镜扫描的时间是主要部分，所以也可以通过考察扫描系统的利用率来对并行处理的效率进行评价。

（2）多牙颌成形效率分析

在上面的分析中，我们做了一个假设，即每个工步的处理时间是与其处理区域的面积成正比的，当加工区域被分解成 n 等份后，认为每个子区域的处理时间变为原来的 $1/n$。而在实际的工艺处理中，由于各种限制的存在以及工艺上的特点，分解后的处理的时间往往有一定的变化。多牙颌的分区并行处理将加工区域分解成两部分，对于每部分而言，扫描操作的时间基本上是整体的 1/2，但是涂覆前等待和等待流平时间却是和整体时间相同的，这是因为这两个步骤都是工艺的需要而不是具体的加工操作，其中等待流平时间是和单个牙颌的截面积相关，面积越大等待时间越长；涂覆前等待和层在零件中的位置以及牙颌截面积相关，越靠近基础部分、截面积越大等待时间越长。涂覆的时间更要复杂一些，对于串行方式下，涂覆是采用的单向涂覆方式，在并行下，由于工艺的需要，必须采用双向往复式涂覆，因此每部分的涂覆距离并不是整体涂覆距离的一半儿而是基本与整体相同，涂覆速度是在串行下速度的 1～2 倍之间，因此每部分的涂覆时间是整体涂覆时的 0.5～1 倍之间。图 6.4-33 是 10 牙颌和 16 牙颌同时成形串行方式和并行方式（每组 5 个牙颌）每层耗时的统计。



(a) 10 牙颌处理时间对比



(b) 16 牙颌造型时间对比

图 6.4-33 牙颌造型时间对比

造型参数如下。

造型方式：Exact™；

激光功率：100 mW；

填充间距：0.1 mm；

一次扫描速度：5 m/s，二次扫描速度：6.5 m/s

从图 6.4-33 可以看出除最初几层外，串、并行耗时以及振镜扫描时间随着层数的增加都不断下降，这是由于随着层数的增加，牙颌从牙龈部分向牙冠部分过渡，截面积逐渐减小，各个工艺步骤的耗时被缩短，因此总的处理时间也相应下降。在最初的几层由于数据处理的误差，分层方向与牙颌底面存在一定的角度，切分出的截面面积随层数的增加而增加，从而造成了处理时间随层数而加长。

绝大多数情况下，单层串行处理时间要高于并行处理时间，但是当造型接近结束的时候，并行处理时间反而高过串

行处理时间，这一现象产生的原因以及临界点的计算我们在下一节详细讨论。表 6.4-5 是 10 牙颌和 16 牙颌的造型数据统计。并行的总处理时间都小于串行的总处理时间，其中 10 牙颌时间节省了 23.9%，16 牙颌节省了 22%。在振镜利用率上，并行方式也要高于串行方式，当 16 牙颌同时成形时，振镜的利用率达到 95.3%，已经接近了理论上的极限值。16 牙颌采用并行方式效率的提高率相对于 10 牙颌要稍低一些，这是因为当牙颌增多单层的扫描时间增加，但是相应的辅助处理过程（涂覆前等待、等待流平）的时间没有改变，串行过程的效率也增加了。

表 6.4-5　串、并行成形时间统计

牙颌	扫描时间/s	串行总时间/s	串行振镜利用率/%	并行总时间/s	并行振镜利用率/%	效率提高率/%
10	6 385	9 685	65.9	7 375	86.6	23.9
16	10 497	14 119	74.3	11 012	95.3	22

另外从图 6.4-33 中还可以看出，在层数较低时，振镜的扫描时间曲线是和并行处理的时间曲线是重合的，这说明此时在扫描进行的过程中涂覆子过程就已经完成了，并行处理的时间就是扫描的时间。随着层数增加扫描面积不断减小，扫描的时间也不断减少，当扫描时间减少到一定的程度后，辅助过程完成的时间会超过扫描的时间，此时并行处理的时间由由辅助过程的时间来决定，因此两条曲线也在此点处分开。对于 10 牙颌的成形，分开的点在 70 层左右，对 16 牙颌这个点在 100 层左右。由于每条曲线与 X 轴所包围的面积就是对应过程所消耗的时间，因此分开点越是靠近结束层，扫描的时间就越与并行处理的时间接近，造型的效率也就越高。

3.2.5　分组并行处理中的临界点问题

从图 6.4-33 中已经知道，对 10 牙颌在 117 层左右，16 牙颌在 121 层左右出现了临界点，即在此点之后并行处理的时间反而要超过串行处理的时间。这种现象的产生可以由图 6.4-34 来解释，对多牙颌激光固化成形采取分区并行处理后，某些工艺步骤的处理时间被加长了，比如涂覆子过程中的各个工步，当这些工步成为造型的主要时间而且并行所节省下来的时间不能弥补这些工步加长的时间时，就会造成效率的下降。

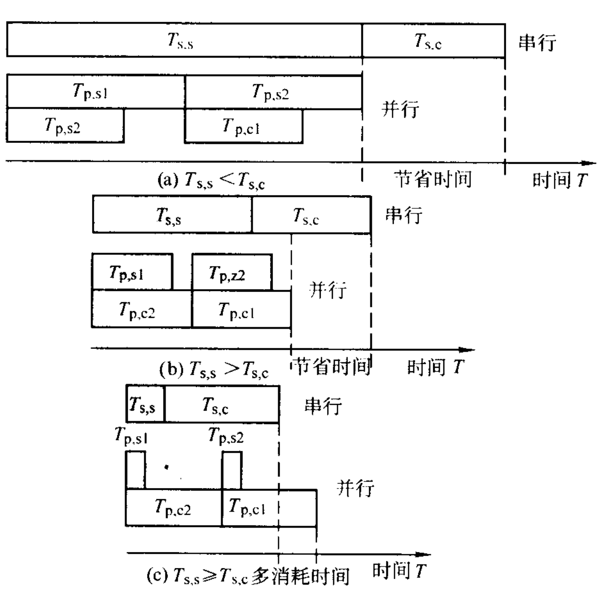


图 6.4-34　临界点产生的原因

其中各符号代表意义：

$T_{s,s}$ 为串行扫描子过程时间；$T_{s,c}$ 为串行涂覆子过程时间；$T_{p,s1}$ 为并行子区域 1 扫描子过程时间；$T_{p,s2}$ 为并行子区域 2 扫描子过程时间；$T_{p,c1}$ 为并行子区域 1 涂覆子过程时间；$T_{p,c2}$ 为并行子区域 2 涂覆子过程时间。

如 3.2.4 节所分析的，并行各个子区域的扫描时间总和与串行相等，所以满足：

$$T_{S,S} = T_{p,s1} + T_{p,s2} \tag{6.4-20}$$

在并行的涂覆子过程中，每个子区域的等待流平、涂覆前等待的时间以及涂覆操作的距离与串行方式相等，而涂敷操作的速度是串行方式下的 1～2 倍，因此涂敷子过程的时间满足如下关系式：

$$T_{S,C} < T_{p,c1} + T_{p,c2} < 2T_{S,C} \tag{6.4-21}$$

从图 6.4-34 可以看出，在并行处理中，当子区域的扫描时间超过涂覆子过程的时间时，并行处理的时间为扫描时间，此时必然小于串行的总时间，效率肯定会得到提高。当子区域的扫描时间小于涂覆子过程的时间后，并行处理的时间为两个子区域涂覆子过程的时间和，由于涂覆子过程的时间被加长，因此并行的可能会超过串行的时间，效率也可能下降。具体的临界点很容易从图中的关系进行推导出来，当出现临界点后，

$$T_{parallel} \geqslant T_{serial} \tag{6.4-22}$$

即

$$T_{p,c1} + T_{p,c2} \geqslant T_{S,S} + T_{S,C} \tag{6.4-23}$$

串行和并行中子区域的扫描时间，涂覆前等待，等待流平时间和涂覆距离都是相等的，分别记做 Tscan，Tpredip，Twait，L，串行下的涂覆速度记做 V_s，并行下的涂敷速度记做 V_p，则有

$$2\left(\frac{1}{V_p} + T_{predip} + T_{wait}\right) > T_{scan} + \frac{L}{V_s} + T_{predip} + T_{wait} \tag{6.4-24}$$

整理后，可以得到临界点的表达式，

$$T_{scan} < \frac{L}{V_p} - \frac{L}{V_s} + T_{predip} + T_{wait} \tag{6.4-25}$$

式（6.4-25）的右侧恰是由于串行工艺改为并行工艺后而增加的额外时间，所以该式表达的意义就是当扫描的总时间低于由于采用并行而增加的额外的时间的时候，并行的效率反而会下降。

3.2.6　结论

通过对上述牙颌模型制作的案例分析可以看出，在 10 牙颌和 16 牙颌制作过程中，成形效率分别提高了 23.9% 和 22%，其中振镜利用率分别达到了 86.6% 和 95.3%。在成形零件尺寸较大同时满足分区并行处理的条件时，采用分区并行处理的方法可以有效地提高成形效率。同时也必须考虑到并行处理的临界点条件，在一定条件下，采用并行处理的效率反而不如串行处理。

4　光固化快速成形设备

光固化工艺作为最早商品化的快速成形工艺之一，其设备制造商遍布世界各地，例如美国的 3D Systems 公司、日本的 CMET 公司、以色列的 Cubital 公司、中国的北京殷华快速成形与模具有限公司、上海联泰公司、陕西恒通智能机器有限公司、华中科技大学等。这些公司推出的光固化成形设备主要性能参数如表 6.4-6、表 6.4-7 所示。

表 6.4-6　国外主要光固化设备的性能参数

性能		3D Systems 公司			CMET 公司	
		SLA250/50	SLA7000	Viper si2 SLA	Rapid Meister 6000	Rapid Meister 3000
激光器	类型	气体激光器	固体激光器	固体激光器	固体激光器	固体激光器
	功率/mW	24	800	100	800	200
涂覆系统		Zephyr	Zephyr	Zephyr	Blade	Blade
分层厚度/mm		0.1	0.0 254	0.06	0.05	0.05
光学系统	光斑直径/mm	0.2～0.28	0.23～0.838	0.25～0.075	可变	0.1～0.6
	扫描速度/$m \cdot s^{-1}$	0.762	2.54～9.52		15	12
成形空间/mm		250×250×250	508×508×584	250×250×250	600×600×500	300×300×250

表 6.4-7　国内主要光固化设备的性能参数

性能		北京殷华公司	上海联泰公司	陕西恒通智能机器有限公司	华中科技大学	
		Auro350	RS600S	SPS600B	HRPL－II	HRPL－III
激光器	类型	固体激光器	固体激光器	固体激光器	固体激光器	固体激光器
	功率/mW	100～400	400			
涂覆系统		Blade				
分层厚度/mm		0.1	0.05～0.5	0.05～0.2	0.05～0.3	
光学系统	光斑直径/mm	0.1	0.15～0.2	<0.2	<0.2	
	扫描速度/$m \cdot s^{-1}$	8	8	2～8 m/s		
成形空间/mm		350×350×350	600×600×400	600×600×400	350×350×350	600×600×500

4.1　美国 3D Systems 公司

美国的 3D Systems 公司 1987 年推出了第一台商品化的光固化成形设备 SLA－1，1989 年又推出了类似的设备 SLA－250，1990 年推出了成形空间更大、速度更快的光固化成形设 SLA－500。至今，3D Systems 公司的光固化成形设备型号包括 SLA－3500、SLA－5000、SLA－7000 和 Viper si2 SLA 等。其中，SLA－3500 和 SLA－5000 使用半导体激励的固体激光器，扫描速度分别达到 2.54m/s 和 5m/s，成形层厚最小可达 0.05mm。此外，还采用了一种称之为 Zephyr recoating 的新技术，该技术是在每一成形层上，用一种真空吸附式刮板在该层上涂一层 0.05～0.1mm 的待固化树脂，大大改善涂覆的质量，且使成形时间平均缩短了 20%。1999 年推出的SLA－7000 机型与 SLA－5000 机型相比，成形体积虽然大致相同，但其扫描速度却达 9.52 m/s，成形层厚最小可达 0.0254mm，精度提高了 1 倍。



图 6.4-35　SLA－250 的外形图

图 6.4-35 为 3D Systems 公司的早期产品 SLA－250 的外形图，与早期的产品相比，SLA－7000、Viper si2 SLA 等新型光固化成形设备在成形精度和成形效率上都更为优越，下面详细介绍 SLA－7000 和 Viper si2 SLA 这两种型号的设备。

1）SLA－7000 设备　1999 年推出的光固化成形设备 SLA－7000 在成形精度和成形效率方面比以前的产品都有大幅度的改进，该设备设有两种光斑模式，小光斑模式下光斑直径为 0.23 mm，大光斑模式时其直径为 0.685 mm。在要求精度较高时可以采用小光斑模式，而要求成形效率时则采用大光斑，两种模式的设定更能贴近实际应用。图 6.4-36 为 SLA－7000 的外形图。

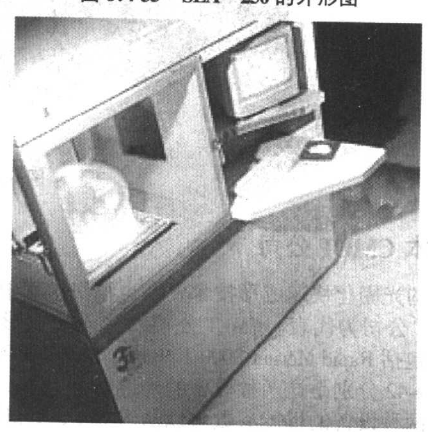


图 6.4-36　SLA－7000 的外形图

SLA－7000 的成形空间为 508×508×584 mm^3，对于这么大的成形空间，如果直接将扫描振镜安装在树脂液面的正上方，则液面到振镜的焦距会很大，导致设备高度非常高。为

避免这种现象，SLA－7000采用了反射镜式光路系统，在树脂液面上方安装了一块大的反射镜，将扫描振镜安装在树脂槽的侧面，从而减少了设备的总体高度。较大的成形空间使该设备的应用范围更加广泛。

SLA－7000的另一个特点就是采用了大功率的紫外固体激光器，其功率高达800mW。早期的SLA－250采用的是气体激光器，其功率只有24 mW。与气体激光器相比，固体激光器的功率和使用寿命都大大改善。SLA－7000的激光器额定使用寿命为5 000 h或18个月（取决于哪个时间先到达）。由于市场对光固化设备的成形精度和成形效率要求在不断的提高，因此在光固化快速成形设备中采用大功率固体激光器已经称为大势所趋。

SLA－7000由于其精度高而广泛应用于快速模具、塑性模型、功能测试、精密铸造模具、商业概念模型制造等领域，图6.4-37、图6.4-38是采用SLA－7000制作的零件外形图。

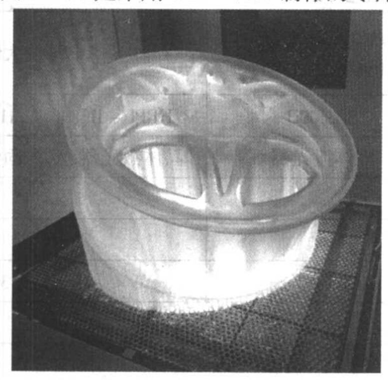


图6.4-37　SLA－7000制作的零件

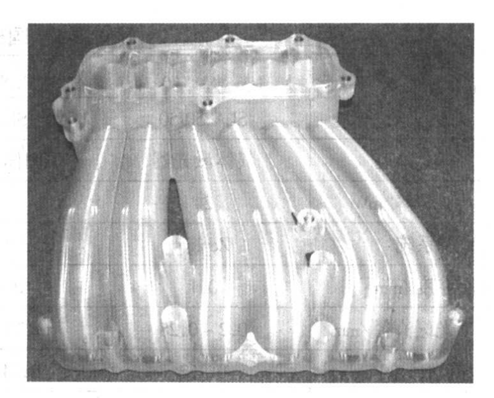


图6.4-38　SLA－7000制作的零体

2）Viper Si2 SLA设备　Viper Si2 SLA是3D Systems公司推出的较新的光固化成形设备，它的最大特点就是提供了两种成形模式：标准模式和高分辨率成形模式。标准模式下光斑直径为0.25 mm±0.025 mm，而高分辨率模式下的光斑直径为0.075 mm±0.015 mm。标准模式在成形精度和成形效率之间选择一个平衡点，适用于一般情况下的成形需要；而高分辨率模式适合于制作一些非常精细的零件，其尺寸精度和表面质量都非常高。图6.4-39是Viper si2 SLA光固化成形设备的外形图，图6.4-40为采用Viper si2 SLA设备制作的零件。

对于光固化成形工艺而言，为了提高成形件的尺寸精度和表面质量，通常的措施是采用较小的分层厚度和光斑，而这样做的后果就是成形时间大大延长。例如，通常光固化成形的分层厚度为0.1 mm，如果将分层厚度减小到0.05 mm，则零件的层数就会增加到原来的2倍，总的成形时间也会增加到原来的2倍左右；如果进一步减少光斑直径，则扫描时的填充间距也必须减少，每一层的扫描填充时间大大增加，整个成形效率会严重下降。对于某些特殊要求的零件，Viper si2 SLA的高分辨率成形模式非常合适；同时它的标准模式又能满足普通成形件的成形精度和效率要求。但是，两种模式切换比较复杂，操作并不方便。

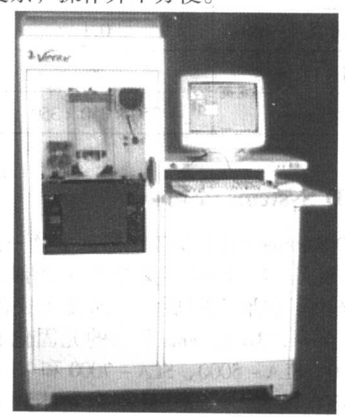
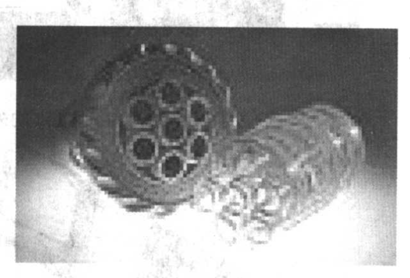


图6.4-39　Viper si2 SLA的外形图



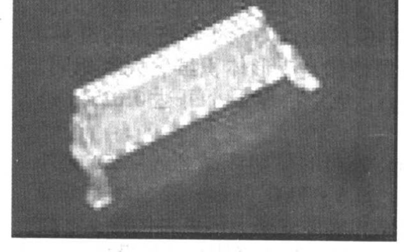


图6.4-40　Viper si2 SLA制作的零件

4.2　日本CMET公司

日本的光固化快速成形技术发展也很快，其中设备制造商以CMET公司为代表。CMET公司的光固化成形设备中较新的型号包括Rapid Meister 3000和Rapid Meister 6000，图6.4-41、图6.4-42分别是这两种设备的外形图。

上述两种设备的性能参数可以从表6.4-6中查到，CMET的光固化成形设备的一个特点就是其液面控制系统一般都采用溢流方式，这主要是由于其使用的光敏树脂黏度小，流动性好。例如CMET通常使用的光敏树脂TSR－820的黏度约为300 MPa·s，而DTM公司的光敏树脂Somos 7110的黏度在700 MPa·s左右。因此，与美国3D Systems公司相比，CMET公司在液面控制系统上的机构设计相对要简单许多。同时，CMET公司的光固化成形设备的涂覆机构通常都采用双刮板结构，利用树脂的自然吸附作用在刮板中储备一定的树脂，刮板的刃口设计成特殊的形状，以减少对已固化表面的破坏机率。

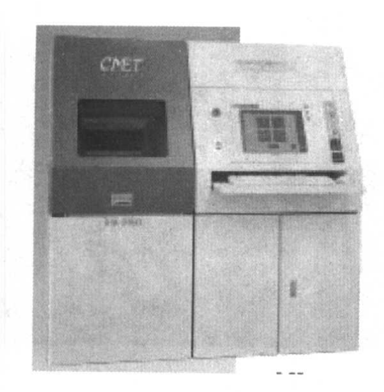


图 6.4-41　Rapid Meister 3000 的外形图

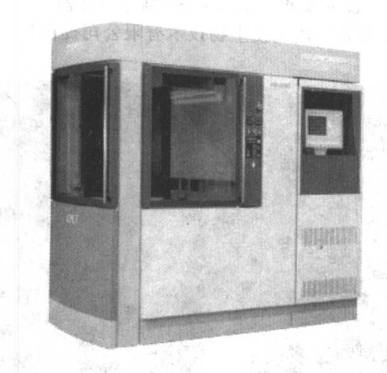


图 6.4-42　Rapid Meister 6000 的外形图

CMET 公司的光固化成形设备在液面控制系统和涂覆机构上都没有 3D Systems 的复杂，但其成形质量和成形效率依然是很不错的，受到了不少业内人士的好评，图 6.4-43、图 6.4-44 是采用 CMET 的光固化成形设备制作的性能测试件及原型零件，其表面质量和细节精度丝毫不逊于 3D Systems 公司的产品。

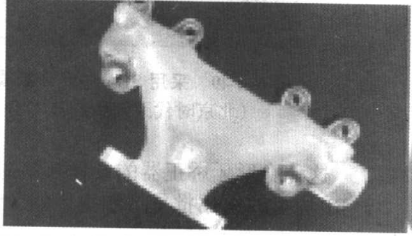
4.3　陕西恒通智能机器有限公司

陕西恒通智能机器有限公司是国内较早从事光固化快速成形设备开发的企业，自 1997 年至今已开发已经开发出气体、固体激光快速成型机、紫外光快速成型机、真空注型机等多种快速成型与模具制造设备。该公司早期的光固化成形设备一般采用气体激光器或紫外灯聚焦作为光源，成形时扫描速度较低，一般在 2 m/s 以下；目前也开发了以紫外固体激光器作为光源的光固化成形设备。该公司的光固化成形设备有 LPS、CPS 和 SPS 三个系列，图 6.4-45 是 SPS600 的设备外形及其成形的模型，其性能参数见表 6.4-7。

4.4　北京殷华公司

Auro－350 是北京殷华公司最近推出的光固化快速成形设备，它的设计目标定位在高性能和快速制造上，是一种具有较高成形精度和成形效率的快速成形设备，图 6.4-46 是该设备的外形图。

Auro－350 在总体设计上符合了光固化设备发展的趋势，采用紫外固体激光器和高速扫描振镜，使整个设备的成形效率和成形质量都非常优越。成形材料采用美国 DTM 公司的



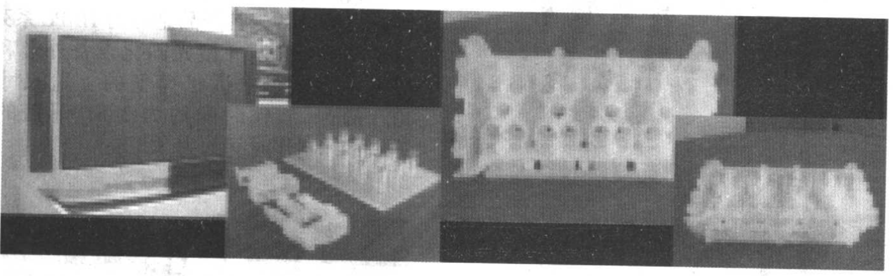


图 6.4-43　CMET 公司制作的性能测试件

图 6.4-44　CMET 公司制作的原型



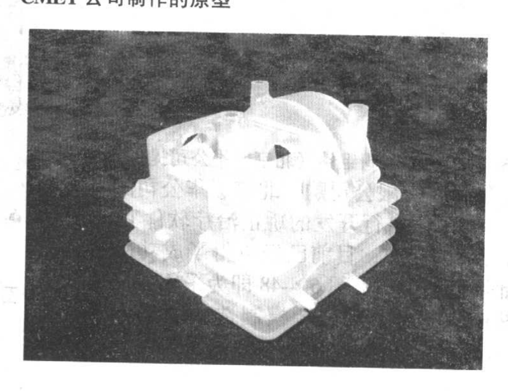


图 6.4-45　SPS600 设备及其制作的零件（陕西恒通公司提供）

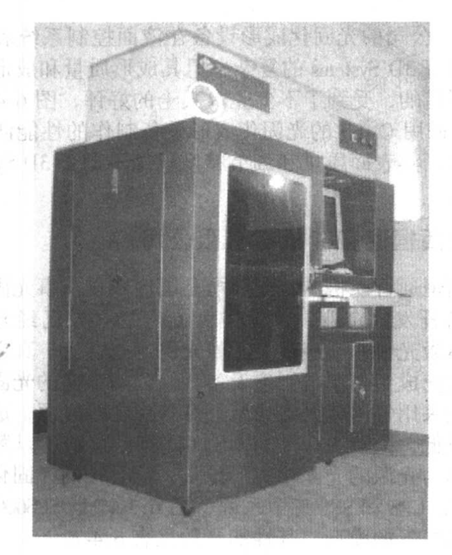


图 6.4-46　Auro－350 的外形图（北京殷华公司提供）

新型光敏树脂 Somos 11120，成形材料本身的收缩很小，成形件的强度较高，从而保证了成形件的尺寸精度和性能指标。在工艺上 Auro－350 也采用了许多新的措施，例如涂覆工艺方面采用了智能涂覆工艺，根据零件截面形状不同而选用合适的涂覆速度，充分发挥涂覆机构的涂覆能力，有效地提高了涂覆效率；控制软件方面对各个工艺参数都进行了优化，保证了成形质量，提高了成形效率；分层软件方面采用独特的齿形支撑算法，减少了生成支撑和分层的时间。各种措施使得 Auro－350 光固化设备不论在成形效率还是在成形质量上都具有较高的水准。

Auro－350 光固化成形机技术参数见表 6.4-7，采用该设备制作的节流阀如图 6.4-47 所示。



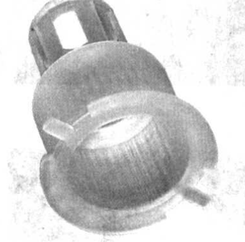


图 6.4-47　Auro－350 制作的节流阀组件（北京殷华公司提供）

北京时代天使生物科技有限公司购买北京殷华公司的光固化成形设备 Auro－350 采用自行开发的矫正治疗软件 OrthoDS 进行了透明牙矫正器的制作，目前已经取得了成功的治疗病例，并开始大批量定制生产。图 6.4-48 即为采用 Auro－350 制作的牙模，图 6.4-49 为采用该牙模制造的隐形（透明）牙矫正器。

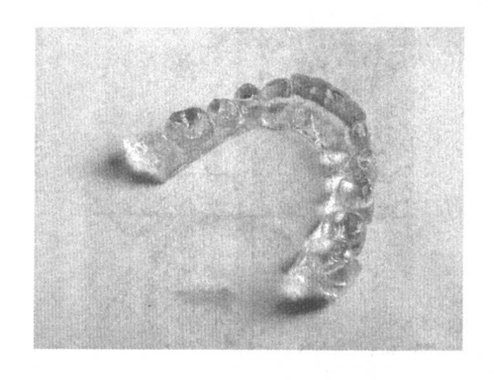


图 6.4-48　Auro－350 制作的牙模
（北京时代天使生物技术有限公司提供）

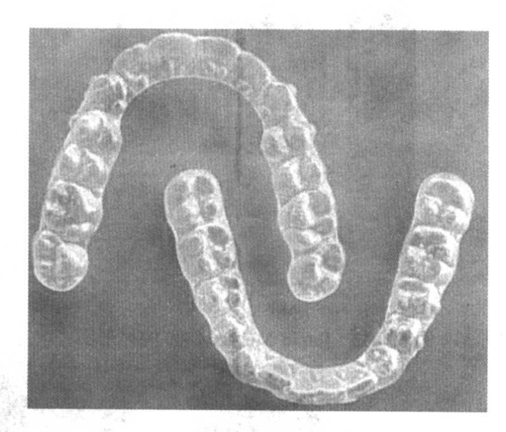


图 6.4-49　采用 SLA 中间牙颌模型膜压的矫正器
（北京时代天使生物技术有限公司提供）

这种隐形牙矫正器的设计与制造过程，是较为典型的基于 RP 原型，采用批量定制生产的个性化医疗器械。

4.5　武汉滨湖机电技术产业有限公司

武汉的滨湖机电技术产业有限公司也设计开发了光固化快速成形设备，其产品型号为 HRPL 系列。图 6.4-50 为该公司开发的 HRPL－I 型光固化设备外形和采用该设备制作的话机模型，图中话机模型的上盖尺寸为 189.4 × 193.7 × 40.3 mm^3，制作时间约为 3 h，下盖的尺寸为 200 × 50 × 66 mm^3，制作时间约为 3.5 h。

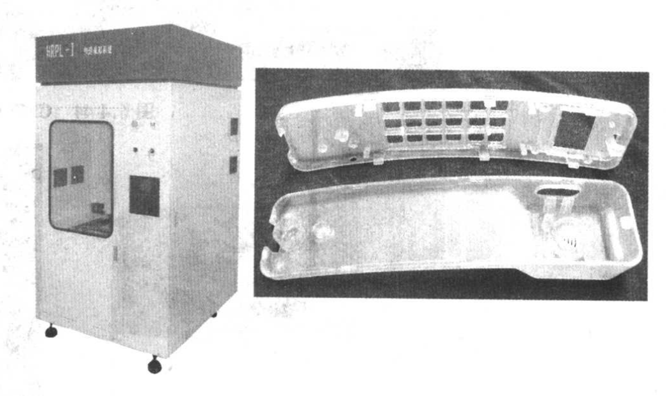


图 6.4-50　武汉滨湖机电技术公司的光固化成形设备及成形零件
（武汉滨湖公司提供）

编写：张定军（清华大学）
王青岗（清华大学）



第5章 激光选区烧结快速成形工艺

1 激光选区烧结快速成形工艺的概述

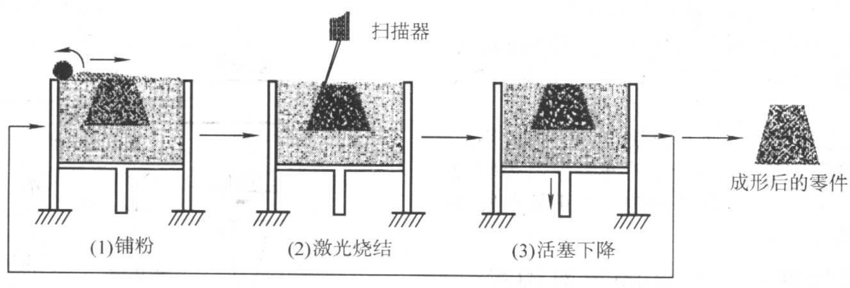
1.1 激光选区烧结基本原理

激光选区烧结 SLS（selected laser sintering）工艺，又称选择性激光烧结，它是采用红外激光作为热源来烧结粉末材料，并以逐层堆积方式成形三维零件的一种快速成形技术。

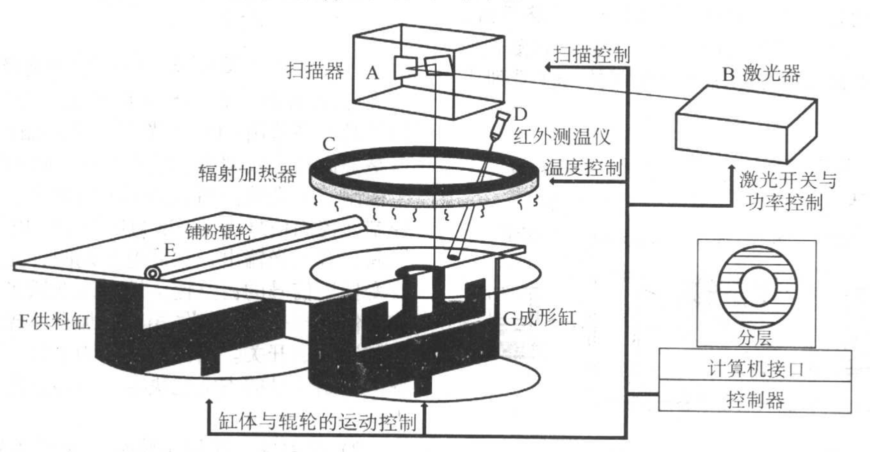
SLS工艺的基本思想是基于离散－堆积成形的制造方式，实现从三维 CAD 模型到实体原型/零件的转变。利用SLS工艺制造实体原型/零件的基本过程如下所示。

第一步，在计算机上，实现零件模型的离散过程。首先利用 CAD 技术构建被加工零件的三维实体模型；然后利用分层软件将三维 CAD 模型分解成一系列的薄片，每一薄片称为一个分层，每个分层具有一定的厚度，并包含二维轮廓信息，即每个分层实际上是 2.5 维的；再用扫描轨迹生成软件将分层的轮廓信息转化成激光的扫描轨迹信息。

第二步，在 SLS 成形机上（图 6.5-1），实现零件的层面制造。堆积成形的过程：首先在成形缸内将粉末材料铺平，预热之后，在控制系统的控制下，激光束以一定的功率和扫描速度在铺好的粉末层上扫描。被激光扫描过的区域内，粉末烧结成具有一定厚度的实体结构。激光未扫描到的地方仍是粉末，可以作为下一层的支撑并能在成形完成后去除，这样得到零件的第一层。当一层截面烧结完成后，供粉活塞上移一定距离，成形活塞下移一定距离，通过铺粉操作，铺上一层粉末材料，继续下一层的激光扫描烧结，而且新的烧结层与前面已成形的部分连接在一起。如此逐层地添加粉末材料、有选择地烧结堆积，最终生成三维实体原型或零件。



(a)SLS成形的工作原理



(b)SLS成形机工艺原理及基本组成示意图

图 6.5-1 SLS 工艺原理

第三步，全部烧结完成后，要做一些后处理工作，如去掉多余的粉末，再进行打磨、烘干等处理便获得原型或零件。

SLS工艺由美国德克萨斯大学奥斯汀分校（The University of Texas at Austin）的 Carl R. Deckard 于 1986 年提出并申请了专利，1988 年研制成功了第一台 SLS 成形机，后由美国 B.F.Goodrich 公司投资的 DTM 公司将其商业化，推出 SLS Model 125 成形机，随后推出了 Sintersation 系列成形机。德国 EOS 公司、国内的北京隆源自动系统有限公司、武汉滨湖机电技术产业有限公司等在这一领域也做了很多研究工作，也分别推出了各自的 SLS 工艺成形机。近二十年的时间里，各国的研究学者在 SLS 技术的成形工艺、方法、材料、成形效率、精度控制及其应用方面进行了大量的理论和实验研究。

按烧结用材料的特性，SLS 技术的发展可分为两个阶段：第一个阶段是采用 SLS 技术烧结低熔点的材料来制造原型，所用的材料是塑料、尼龙、金属或陶瓷的包衣粉末（或与聚合物的混合粉末）；第二个阶段则采用 SLS 技术直接烧结高熔点的粉末材料来制造零件。

早期，SLS 主要使用的是塑料粉末，随着工艺和材料的发展及制造业的要求，国内外科技工作者对金属粉末的选区烧结工艺做了大量的研究工作，并取得了重大进步。直接金属激光烧结的优点是成品尺寸比较稳定，受到光线、湿度或

其他环境因素影响的程度较小，而且制造过程中不必使用支撑。使用中断裂时可用瞬间补焊，其强度与原来的强度差不多。

1.2 SLS 工艺特点

与其他 RP 工艺相比，SLS 工艺具有如下特点。

1）SLS 可以成形几乎任意几何形状结构的零件。尤其适于生产形状复杂、壁薄、带有雕刻表面和内部带有空腔结构的零件，对于含有悬臂结构（overhangs）、中空结构（hollowed areas）和槽中套槽（notches within notches）结构的零件制造特别有效，而且成本较低。

2）SLS 工艺无需支撑。SLS 工艺中当前层之前各层没有被烧结的粉末起到了自然支撑当前层的作用，所以省时省料，同时降低了对 CAD 设计的要求。

3）SLS 工艺可使用的成形材料范围广。任何受热黏结的粉末都可能被用作 SLS 原材料，包括塑料、陶瓷、尼龙、石蜡、金属粉末及它们的复合粉。

4）可快速获得金属零件。易熔消失模料可代替蜡模直接用于精密铸造，而不必制作模具和翻模，因而可通过精铸快速获得结构铸件。

5）未烧结的粉末可重复使用，材料浪费极小。

6）应用面广。由于成形材料的多样化，使得 SLS 适合于多种应用领域，如原型设计验证、模具母模、精铸熔模、铸造型壳和型芯等。

SLS 工艺因为具有上述优势，使其很快成为一种应用广泛的快速成形技术，在航空航天、医疗、汽车、家电等领域具有广阔的应用前景。同时，SLS 技术也是一个正处在发展中的技术，还需要不断的完善。

2 激光选区烧结快速成形设备的主要构成

SLS 工艺的成形设备主要由机械主体部分、光路系统、控制系统、冷却装置、辅助加热装置等部分组成，如图 6.5-2 所示。现以北京隆源自动成形系统有限公司的 AFS 系列成形机为例加以介绍。

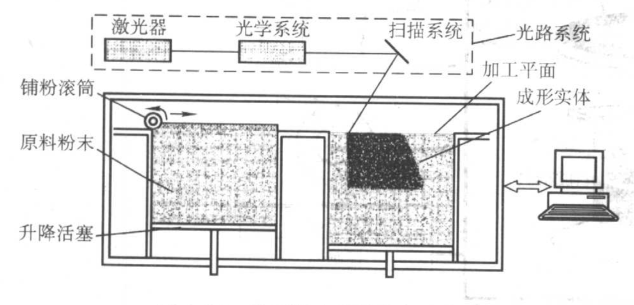


图 6.5-2 选区激光烧结设备示意图

2.1 机械主体部分

成形机的机械主体部分由机架、工作平台、铺粉机构、二个活塞缸、集料箱和通风除尘装置组成。

1）机架　用于支撑设备的其他部分。机架下安有 4 个地脚螺拴，用于调整设备的水平；同时安有 4 个脚轮，便于搬运。

2）工作平台　用于安装铺粉机构和活塞缸，同时作为它们的安装基面。

3）铺粉机构　有滚轮式和刮板式两种。作用是不断提供成形用的粉料并将粉铺平。滚轮在直线运动过程中作反时针旋转，将供料缸中的粉末送至成形缸，并使表面平整。对于大多数粉末材料，滚轮式结构的铺粉效果优于刮板式结构。

4）供粉系统　有活塞顶出式和漏斗下料式两种。活塞顶出式又可分为单缸送料和双缸送料。无论何种送料方式，成形时每次的送料量均应大于成形室的单层成形体积。活塞缸送料方式可靠性强，便于对原料粉末进行加热，但占用设备空间较大。

5）集料箱　用于收集铺粉过程中多铺的粉料和卸料。每次铺粉过程料缸活塞的上升位移均大于成形缸活塞的下降位移，成形缸铺满粉后多余的粉料通过下料口落入集料箱。料缸的一侧也装有一个集料小盒，用于收集铺粉小车回程过程中带回的少量粉料。

6）通风除尘机构　由通风管路和滤尘箱组成，用以排除铺粉过程中产生的飘浮粉尘和烟雾。滤尘箱中装有滤芯，用于阻隔粉尘，以防止粉尘飘逸至大气中。

2.2 光路系统

成形机的基本过程是激光束对粉末材料的选区烧结，激光束的精密控制是成形的关键。成形机光路系统的主要组成部件有：激光器、反射镜、扩束与聚焦系统、扫描器、光束合成器、指示光源等。AFS 成形机光路构成如图 6.5-3 所示。

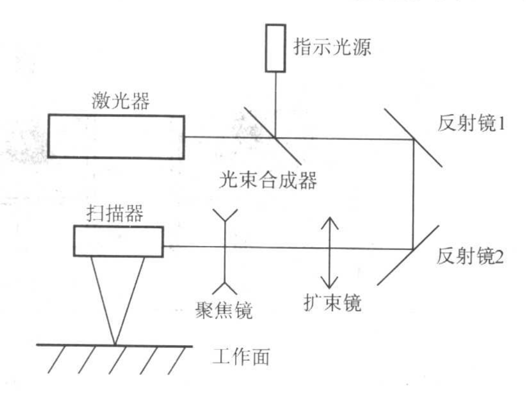


图 6.5-3 AFS 成形机光路系统

1）激光器　在 SLS 成形机上用于烧结塑料聚合物粉末的激光器多采用 CO_2 激光器，最大输出功率为 50 W，其特点是寿命长、效率高、结构紧凑、输出稳定、可靠性高、易于控制。激光的控制分为输出功率大小的控制和光束开关的控制，控制信号为 5 ~ 25 kHz 的 TTL 电平的方波。在高电平期间，有激光输出；在低电平期间，无激光输出。准连续地改变控制信号的占空比，即可改变激光输出的平均功率。将控制信号与一门控信号相与后加在激光器上，通过门控信号控制激光的开关。当门控信号为 1 时，有激光输出，平均功率由控制信号的占空比决定。当门控信号为 0 时，无激光输出。

2）反射镜　作用是将激光束导入聚焦系统，由两个反射镜组成，如图 6.5-3 中的反射镜 1 和反射镜 2。

3）扩束聚焦系统　为了能得到较小的聚焦光斑，让激光先扩束，再聚焦，这样能使光斑更细。

4）扫描器　由两个相互垂直的反射镜组成，分别称为 *X* 扫描镜、*Y* 扫描镜。每个反射镜由一个振动电机驱动。激光束先入射到 *X* 扫描镜，从 *X* 扫描镜反射到 *Y* 扫描镜，再由 *Y* 扫描镜反射到加工表面，电机驱动反射镜振动，控制激光束在有效视场内扫描。

X 扫描镜和 *Y* 扫描镜分别驱使光点在 *X* 方向和 *Y* 方向扫描，扫描角度通过计算机进行控制，这样可以使光点精密定位在视场内的任一位置。扫描振镜的全扫描角（光学角）为 40°，视场的线性范围要由扫描半径确定，光点的定位精度为视场宽度的 1/65 535。

5）指示光源　由于加工用的激光束是不可见光，不便

于调试和操作，用一个可见光束与激光束合并在一起，可在调试时清晰看见激光光路，便于各光学元件的定位。

6）光束合成器　光束合成器通过特殊的镀膜技术，具有对激光束高透、对指示光高反的特性，因而可将两束光合成为一束。此后，在光路中同时有两束光在同一条路径上传输，指示光的位置指示激光束的位置。

2.3　控制系统

SLS 成形机的控制系统是由计算机和多块控制卡组成。其基本过程是由计算机控制铺粉机构，将粉末均匀地铺在烧结面上，然后控制激光器和扫描器，使激光束在烧结面上扫描。完成一层的烧结后，烧结面下降一段距离，完成一次烧结过程。不断重复上述过程即可完成逐层叠加，形成三维实体零件。

激光束扫描控制是由计算机通过控制卡向扫描器发出控制信号，控制扫描器内反射镜的运动以实现激光扫描。

铺粉装置含有多台伺服或步进电机，AFS 成形机共有四台步进电机，其中两台用于供料缸和成形缸活塞的上下运动，一台用于驱动铺粉小车作水平运动，一台用于铺粉小车的滚轮转动。由计算机对各步进电机驱动器进行控制。

2.4　辅助加热装置与冷却装置

用于均匀加热成形缸表面的粉末材料，可以节约激光能量，并且减少成形过程中由于受热不均匀产生的变形。加热器的加热元件是一组远红外陶瓷加热片。加热器安装在一个滑动导轨上，成形时位于成形缸上方（见图 6.5-1b）。

激光器在工作过程中有很大一部分能量变成热能，因而要通水冷却。激光器的冷却水由一台循环水制冷机提供。

3　激光选区烧结快速成形工艺的软件

根据 SLS 工艺的需要，其所涉及的专业软件主要有三类：①分层软件；②扫描路径生成软件；③设备控制软件。

3.1　分层软件

SLS 的分层软件与其他 RP 工艺相同，详见第 3 章。

3.2　扫描路径生成软件

在 SLS 工艺中，最基本的操作是激光扫描。激光扫描分为实体填充扫描和轮廓线扫描两种基本类型。由于分层得到的截面信息是轮廓数据，需要进行内部填充。SLS 填充扫描路径生成软件的功能就是由轮廓数据生成填充扫描路径。

在 SLS 工艺中，激光扫描工艺是其特有的工艺，扫描方式、扫描路径对成形效率及成形质量都有很大的影响。根据激光束的形状类型，扫描方式大致可分为点扫描和线扫描两类。

1）点扫描方式　点扫描方式即激光束截面为一圆斑形状，几何描述为一个点，扫描过程是由点连成线，由线连成面。

常用的点扫描方式有光栅式扫描、螺旋式（或轮廓等距式）扫描以及分形扫描，如图 6.5-4 所示。光栅式扫描简单易行，被广泛采用；螺旋线式扫描比较符合热传递规律，能够降低内部的残余应力，提高烧结件的力学性能。研究表明，在 SLS 成形过程中采用向心螺旋式扫描有利于截面的光滑和平整度。分形扫描的路径是一系列的小折线，激光束的扫描方式不断改变，使得刚刚烧结的部分沿扫描方向可以自由收缩，能够有效的降低片层内部的残余应力。但是，分形扫描方式的加工时间相对较长。

2）线扫描方式　线扫描方式即激光束截面为一细长的矩形形状，几何描述为一个具有一定宽度的线，扫描过程是由线成面，扫描效率显著高于点扫描方式。

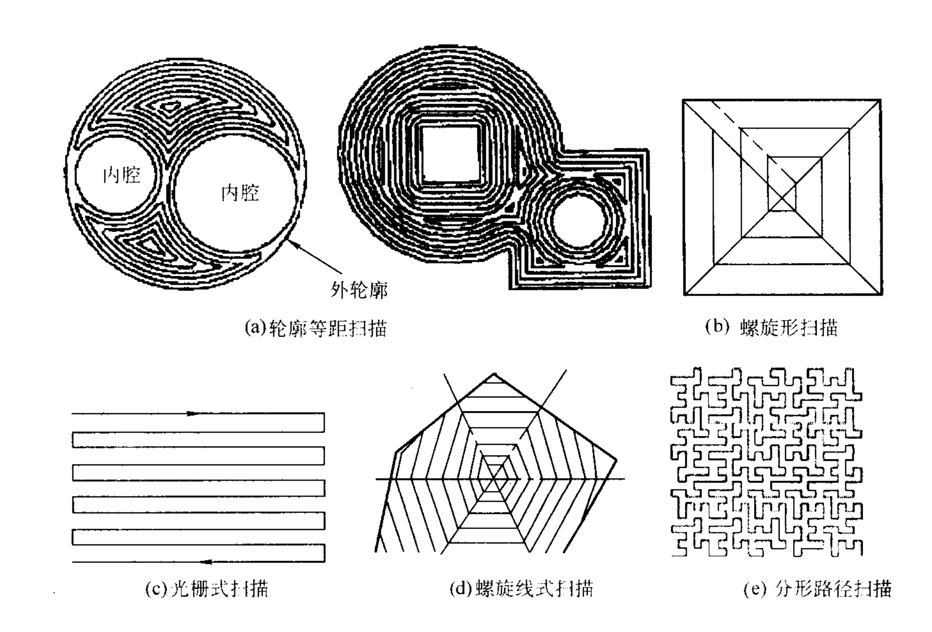


图 6.5-4　扫描方式示意图

激光变长线扫描是通过系统扫描头中的光束变焦系统，将激光器输出的激光束展宽为一条长度可变的激光线段。在成形加工过程中，根据被烧结层面轮廓的几何形状信息，控制激光扫描线中点沿被烧结区域的中心对称线运动，同时不断改变激光扫描线的长度，从而达到利用可变长度的激光线段对层面图形进行扫描烧结的目的。尽管线扫描有以上优点，但由于展开的激光线段因激光的高斯分布特性很难做到能量分布均匀，因此烧结过程存在不均匀现象，同时由于线扫描在精度控制上尚有较大难度，目前并未进入实用阶段。



3.3 设备控制软件

SLS设备控制软件完成对成形机的各种控制及对零件的加工操作。主要包括以下功能：

1）系统初始化、状态信息处理、故障诊断和人机交互功能。

2）对电机系统进行各种控制，提供了对成形活塞、供粉活塞、铺粉滚筒的运动控制。

3）对扫描器系统进行各种控制，如调整扫描器系统的中心点，设置扫描器的运动速度，设置扫描延时等。

4）设置自动成形设备的各种参数，如调整激光功率等。

5）提供了对成形设备的各个方面的协调控制，完成对零件的加工操作。

SLS控制软件的输入数据有：

1）被加工零件的分层填充扫描数据文件。

2）根据需要设置的控制参数或选项的输入。

4 激光选区烧结快速成形工艺的成形材料

理论上讲，所有受热后能相互黏结的粉末材料或表面覆有热塑（固）性黏结剂的粉末都能用作SLS材料。但要真正适合SLS烧结，要求粉末材料具有良好的热塑（固）性，适当的导热性，较窄的“软化－固化”温度范围，粉末经激光烧结后要有足够的黏结强度；粉末材料的粒度不宜过大，其粒径一般要求在50～150 μm之间。国内外已研制成功并投入应用的成形材料有石蜡、高分子材料（尼龙、聚碳酸酯、聚苯乙烯、ABS等）、陶瓷、金属及其与高分子材料的复合物。

SLS工艺对成形材料的基本要求为：

1）具有良好的烧结成形性，即无需特殊工艺即可快速精确地成形原型。

2）对于直接用作功能零件或模具的原型，其力学性能和物理性能（强度、刚性、热稳定性、导热性及加工性能）要满足使用要求。

4.1 石蜡粉末

用作SLS的蜡粉一般应满足：①具备良好的烧结成形性能；②考虑对后续精密铸造工艺的适应性，要求成形质量好，成形蜡模的强度和精度要高，且便于打磨处理；③脱模性好，制得的蜡模可方便、快速地脱除，且残留少。

传统的熔模精铸用蜡（烷烃蜡、脂肪酸蜡等），其熔点较低，在60℃左右，烧熔时间短，烧熔后没有残留物，对熔模铸造的适应性好，且成本低廉。但存在一些缺点，如：①对温度敏感，烧结时熔融流动性大，使成形不易控制；②成形精度低；③蜡模强度较低，难以满足具有精细、复杂结构铸件的要求；④粉末的制备十分困难。

目前国内外从事SLS技术研究的单位，研制了低熔点高分子蜡的复合材料代替实际意义上的蜡粉，其成形模强度明显提高，可制作厚壁的熔模铸件模型，具有良好的精铸适应性。

4.2 聚合物粉末材料

目前可用于SLS工艺的聚合物材料主要有：聚苯乙烯、聚碳酸酯、ABS、尼龙等。

1）聚苯乙烯（PS） 聚苯乙烯属于热塑性树脂，它的比热容较低，加热流动和冷却固化速度快，熔体黏度适中，且流动性和热稳定性较好，烧结成形性能良好，有利于SLS工艺成形。聚苯乙烯无明显熔点，熔融温度范围较宽，约在95℃左右开始软化，120～180℃之间成为流体，300℃以上开始分解，放出气体，到380℃以上就会剧烈分解。聚苯乙烯的吸湿率和收缩率很小，其粉料经过改性后，即可作为SLS成形用材料。

PS烧结件经不同的后处理工艺，可具有以下功能：①结合浸树脂工艺，进一步提高其强度，可作为原型件及功能零件；②经浸蜡后处理，可作为精铸模，用于生产金属铸件。但PS模的脱除困难，必须采用高温烧结法，烧结过程易造成环境污染。

2）工程塑料ABS ABS属于热塑性塑料，其烧结成形性能好，成形件强度高，着色性好。其成形件一般也要进行浸树脂后处理工艺，以进一步提高强度，满足使用要求。

3）聚碳酸酯（PC） 聚碳酸酯的烧结性能良好，成形件强度高，表面质量好，且脱模容易，主要被用于制造熔模铸造用消失模，与PS相比，更适合于制造形状复杂、多孔、薄壁铸件。PC成形件也可以通过渗入环氧树脂及其他热固性树脂来提高密度和强度，用来制作要求不高的模型或增强塑料模。

4）尼龙（PA） 尼龙材料用SLS方法可被制成功能模型。目前在SLS方法中使用的主要有尼龙和共聚尼龙。尼龙材料的突出优点是具有很好的力学性能和耐热性，是目前快速成形方法中强度最高的有机材料，被广泛地用于功能零件地制造。尼龙材料可单独使用，也可与无机材料复合以降低其成形收缩率。

4.3 金属粉末材料

20世纪90年代初，从事SLS技术开发的德国EOS公司通过与芬兰Rapid Product Innovations公司合作，研制出可用于SLS成形的烧结不收缩铜粉和不锈钢粉，从而将SLS技术拓展到了金属材料成形领域。原DTM公司及新加坡理工大学都有粉末材料方面的专利技术。

SLS工艺用的金属粉末材料，按其组成情况可以分为三种：

1）单一的金属粉末，如铁粉；

2）两种熔点不同的金属粉末的混合体，其中一种熔点较低的起黏结剂的作用，如Fe－Sn、Fe－Cu、Cu－Sn、Ni－Sn等混合粉末；

3）金属粉末和有机黏结剂粉末的混合体。

4.4 陶瓷粉末材料

陶瓷粉末很难通过SLS技术直接烧结成形，一方面是由于陶瓷材料的烧结温度很高，另一方面是由于价格原因，SLS所用的激光器通常功率较低。目前，对于陶瓷粉末的SLS成形研究，一般要先在陶瓷粉末中加入黏结剂，在激光束扫描过程中，利用熔化的黏结剂将陶瓷粉末粘接在一起，从而形成一定的形状，然后再通过后处理以获得足够的强度，这种成形方式通常称为间接成形。

研究表明，黏结剂的种类、黏结剂的引入方式以及黏结剂的加入量对于成形精度和成形件的强度有着重要影响。李景新等人的研究表明，采用液相条件下黏度较低的黏结剂，有利于材料的SLS成形。主要是因为这类黏结剂经高温熔化后流动性较好，有利于烧结过程中物质的迁移，从而使制件在组织和性能上趋于均匀。此外，由Nealkent等人的实验可知，采用黏结剂包覆陶瓷粉末的方式得到的坯体比黏结剂与陶瓷粉末混合得到的坯体强度更高，并且最终制件的成形精度和力学性能也更好。这是因为采用黏结剂包覆方式得到的坯体其内部的黏结剂和陶瓷颗粒分布更加均匀，坯体在后处理过程中的收缩变形性相对较小，所得零件的内部组织也更均匀。在最初的SLS技术研究中多采用有机玻璃PMMA作黏结剂，加入量很大，使得坯体中陶瓷粉的体积分数过小，在后处理过程中容易产生开裂、变形等缺陷。选择合适的黏结



剂，提高坯体中陶瓷粉的百分含量，有利于最终黏结剂的去除以及成形尺寸的精确控制。

4.5　国内外 SLS 成形材料产品

国内外有许多公司和研究单位在成形材料这一领域的研究工作取得了重大进步。

1）国外主要 SLS 成形材料的产品及用途　在 SLS 领域，商品化的 SLS 用成形材料主要有原 DTM 公司和 EOS 公司所开发的产品最具代表性，见表 6.5-1 所示。

表 6.5-1　DTM 公司开发的 SLS 用成形材料产品

公　司	材料型号	材料类型	使用范围
DTM	DuraForm Polyamide	聚酰胺粉末	概念型和测试型制造
	DuraForm GF	添加玻璃珠的聚酰胺粉末	能制造微小特征，适合概念型和测试型制造
	DTM PC	聚碳酸酯粉末	消失模制造
	True Form Polymer	聚苯乙烯粉末	消失模制造
	Sand Form Si	覆膜硅砂	砂型（芯）制造
	Sand Form ZRII	覆膜锆砂	砂型（芯）制造
	CopperPolymide	铜/聚酰胺复合粉	金属模具制造
	RapidSteel 1.0	覆膜碳钢粉	注塑模
	RapidSteel 2.0	覆膜钢粉（316L 不锈钢 + 青铜）	注塑模、金属模
	LaserForm ST－100	覆膜不锈钢粉	注塑模、金属件
	LaserForm ST－200	覆膜 420 不锈钢粉	金属件、注塑模、压铸模
	LaserForm A6	覆膜钢粉	注塑模、复杂零件

2）国内主要 SLS 成形材料的产品及用途　与快速成形设备的研究相比，我国 SLS 专用材料的研究还处在起步阶段，与国外相比存在较大差距。目前北京隆源公司成形机的材料主要为热塑性工程塑料、反应性的热固化树脂及树脂砂等几大类。对于一般的样件制作和精铸熔模，通常使用热塑性塑料。

热塑性烧结材料又可分为非晶态和晶态材料两类。非晶材料由于从熔融态到固态没有结晶过程，因而收缩率较低，成形工艺易于控制。玻璃化温度 T_g、黏流温度 T_f 和融体黏度是非晶材料成形的三个最重要的工艺控制参数。T_f 与 T_g 的差值对成形过程材料的收缩变形有很大影响，而融体黏度直接影响成形零件的密度和强度。北京隆源公司成形机使用的改性 ABS 和改性 PS 成形材料都属于非晶体高分子材料。为了改善材料的烧结性能，在材料中添加了光吸收剂、抗氧剂、润滑剂、降黏剂和抗冲助剂。另外，在 ABS 中加入了阻燃组分；对于 PS 原料，针对铸造消失模的使用要求加入了助分解助剂。这两种材料的主要性能指标见表 6.5-2。

表 6.5-2　ABS 的热塑性烧结材料的主要性能指标

性能＼名称	ABS	PS
外观	白色粉末	白色粉末
粒径/mm	≤0.1	≤0.1
密度/$g \cdot cm^{-3}$	0.49	0.45
水分含量/%	0.3～0.6	0.05
T_f/℃	160～190	170
性能＼名称	ABS	PS
T_g/℃	105	100
抗拉强度/MPa	≥26	≥15
抗弯强度/MPa	≥23	≥33
冲击韧度/$kJ \cdot m^{-2}$	≥2.2	≥3

5　激光选区烧结快速成形的工艺研究

激光选区烧结快速成形技术中的影响参数很多，如几何参数、可控制参数、成形机参数、材料性能参数和分层参数，见图 6.5-5。

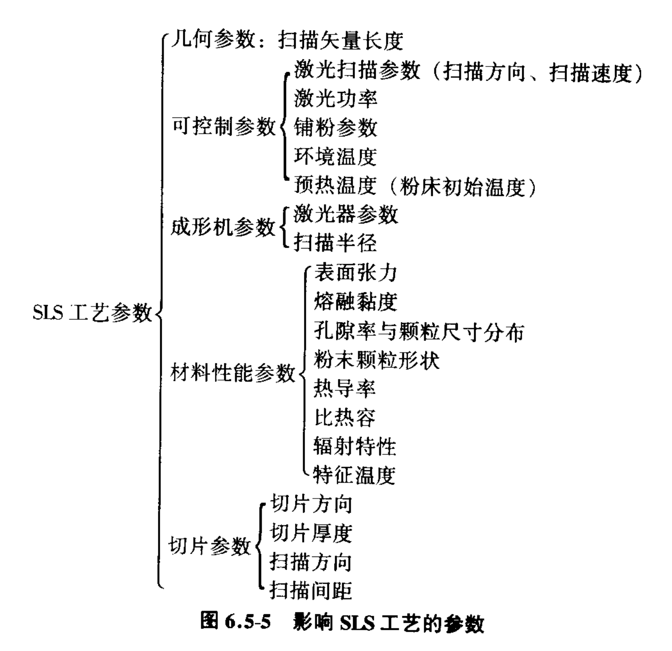


图 6.5-5　影响 SLS 工艺的参数

5.1　可控制参数

可控制参数包括：激光扫描速度、激光功率以及铺粉运动参数、环境温度和粉床表面的预热温度。

1）激光扫描速度　激光扫描速度直接影响成形精度和成形效率。扫描速度慢，则扫描精度高，但成形时间长，扫描平面内的热不均匀性加大，易于变形，影响成形质量。若扫描速度太快，则扫描精度恶化，粉末很快冷却，熔化颗粒

之间来不及充分润湿和互相扩散、流动，烧结体内留下大量孔隙，导致烧结质量下降。

2）激光功率　激光功率直接影响烧结件质量。在SLS工艺中，激光的作用是使粉末颗粒经过熔化、凝固等过程烧结或粘结在一起。激光作用所达到的结果取决于两个因素：①粉体的性能，如比热容、导热率、对特定波长的吸收率等；②激光参数，如平均功率、能量密度分布、作用时间等。

在SLS工艺中，需要解决扫描速度和激光功率的匹配问题。扫描速度和激光功率是一对紧密相关的参数。它们决定了单位时间内对材料的作用强度。一般地，扫描速度快必然要求激光功率高，反之，较小的激光功率只能用较慢的扫描速度。

不同的材料，在扫描速度和其他条件相同的情况下所需的激光能量是不同的，因为粉末的光吸收性、比热容、热导率、热扩散性、熔点不同。如果材料的光吸收性、热扩散系数高，熔点低，在相同的激光能量的作用下，所形成的烧结宽度和烧结深度就大，所以激光功率的选择必须充分考虑材料特性。

3）铺粉参数　铺粉装置主要有刮板式和辊筒式两种。滚轮式结构的铺粉参数包括铺粉滚轮的平移速度、自转速度、自转方向、供料活塞的上升步长、成形缸活塞的下降步长等参数。其中，成形缸活塞的下降步长由分层的厚度决定，料缸活塞的上升步长通常取为成形缸运动步长的1.2～1.5倍，这是为了保证有足够的粉末铺在成形缸上。

在SLS中，铺粉层的均匀性和密实程度将在很大程度上影响烧结件的强度、收缩和翘曲变形，从而影响零件的精度和表面粗糙度。因此，铺粉过程是SLS工艺的关键工序之一。

SLS成形机滚轮式结构的铺粉过程如图6.5-6所示。铺粉过程中，假设滚筒与粉层的接触点为A，则滚筒上A点处的线速度方向与滚筒中心的运动方向相同。这样的设计可以避免滚筒挤压下面的已成形部分。

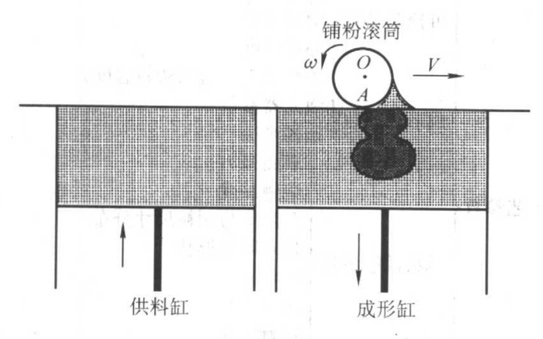


图6.5-6　SLS成形机滚轮式结构的铺粉过程示意图

研究分析表明，滚筒的半径、平移速度、自转角速度的大小和方向对粉末层密度及平整度有至关重要的影响，提高滚轮平移速度固然可以缩短铺粉时间，提高生产率，但过快的平移速度会引起变形区的粉末迅速被压缩，造成平整度和致密度的降低，其组合优化需要根据理论分析和工艺实验做进一步研究。

粉床的密度对烧结的影响有：第一，粉床的初始密度影响有效导热系数和热扩散率，粉床的有效导热系数随粉床密度的增加而增加。第二，粉床的初始密度影响烧结件的收缩率及最终密度，较低的收缩率才可保证较好的尺寸精度。

4）加热参数　预热的作用有两个，一是减小成形过程的热变形，二是节省激光能量。

在激光烧结过程中，不仅存在由激光能量密度分布不均匀造成的温度场分布，而且存在激光扫描在$X-Y-Z$三个方向上变化时序不一致形成的温度场分布。温度场的不均匀导致内应力分布不均匀，从而导致材料的变形。在烧结的最初几层，变形仅表现为X、Y方向上的收缩，随着底层厚度的增加，变形表现出在Z轴方向上的翘曲。将粉床表面预热，可以使整个烧结平面内的温度梯度减小，这样有利于减小烧结过程的变形。一般对于非晶态聚合物，预热温度稍低于材料的软化点。对于晶体材料，则预热温度设定为接近于熔点的温度。

在粉床表面维持恒定的或者实时控制的温度非常困难。观察表明，在SLS工艺过程中，当粉床初始温度接近于非晶体材料的玻璃态转化温度T_g或者晶体材料的熔点T_m时，烧结件的质量有所改善。但是，对于晶体材料，保持粉床温度低于材料的熔点非常关键，如果粉床温度超过材料的熔点，则整个粉床就会熔化，导致SLS工艺失败。

对新铺粉层的加热有两个热源。第一是通过固定在粉床上方的辐射加热器对粉末加热，参见图6.5-1。该加热器带有一个比例积分温度控制器。采用红外传感器来测量粉床表面的温度，并将其反馈给温度控制器。第二是通过粉层底部已烧结部分对粉层的加热，如图6.5-7所示，当一层烧结完毕后，在其上部重新铺上一层粉末，这层粉末从其下面的已烧结部分吸收热量。随着烧结层数的增加，烧结件内部的热量也增加，这种加热效果也就越明显。在某些情况下，烧结件内部的热量向周围扩散，导致其周围部分粉末温度的提高，甚至高于材料的玻璃态转化温度T_g（非晶体材料）或熔点T_m（晶体材料）。这时，就会引起周围的粉末的继续烧结，使得烧结件的横向尺寸增加。

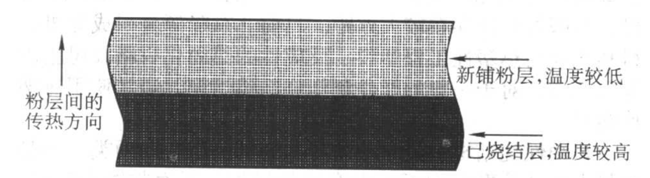


图6.5-7　已烧结部分对粉层的加热

5.2　成形机参数

成形机参数是由SLS成形机的设计规格确定的、在工艺过程中不可控制的专用参数，它包括激光器的类型和扫描半径。一旦成形机组装完成后，这些参数的值就不可改变。

1）激光器　目前，SLS成形机上常用的激光器有三类：CO_2激光器、YAG激光器和固体Yb光纤激光器。一般，YAG激光器用于烧结无机材料如陶瓷和金属材料粉末，因为金属粉末对CO_2激光器发出的激光的反射率比对YAG激光器发出的激光的反射率大得多。而CO_2激光器多用于烧结有机材料如晶体与非晶体聚合物粉末。固体Yb光纤激光器的显著特点是光斑半径小，最小光斑仅为100 um，功率密度大，可支持更高的扫描速度，减少激光作用下零件的热影响和成形过程的变形。同时，Yb激光的波长更易于金属的吸收。CO_2激光器输出激光的波长为10.6 μm，YAG激光器输出激光的波长为1.06 μm。材料对不同波长激光的吸收率是不同的。

CO_2激光器将电能转化成光能的效率比较高，这使得它在工业中以及SLS成形机中得到了广泛的应用。设CO_2激光器以TEM_{00}基模输出，则输出功率为P的TEM_{00}模（高斯模）在激光光斑上的功率密度或光强分布为

$$I(r,\omega)=I_o\exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right)\qquad(6.5\text{-}1)$$

式中，ω为激光束的特征半径，m；r为考察点距离光斑中



心的距离，m；I 为位置 r 处的光强，W/m^2；I_o 为光斑中心的光强，W/m^2。

激光的输出功率 P 可由下式确定：

$$P = 2\pi\int_0^\infty Ir\mathrm{d}r \tag{6.5-2}$$

将方程式（6.5-1）代入式（6.5-2）中，可得到关系式：

$$I_o = \frac{2P}{\pi\omega^2} \tag{6.5-3}$$

2）扫描半径　扫描半径 SCR（scan radius）是指从扫描器的反射镜到粉床表面的距离，它是由 SLS 成形机的规格确定。对于给定的扫描参数，扫描半径只对烧结平面上的光斑扫描速度 V_{bs} 有影响。扫描速度的调节是通过控制反射镜的转动速度来实现的。因此，当扫描半径增加时，烧结平面上的扫描速度也相应成比例地增加。扫描速度（m/s）的计算式：

$$V_{bs} = 11.108\frac{SS \times SCR}{SP} \tag{6.5-4}$$

式中，SS 和 $SP_{(\mu s)}$ 均为扫描参数。

增加扫描半径可以带来两个好处：第一，在扫描振镜的最大转动角度保持不变的情况下，可使得烧结平面上扫描域扩大；第二，对于相同的转动角速度，较大的扫描半径使得烧结平面上的扫描速度也相应增大。

5.3　材料性能参数

成形材料是SLS技术发展和烧结成功的一个关键环节，材料性能对选区激光烧结的工艺过程、成形精度和成形零件的综合性能有很大影响。与 SLS 工艺相关的材料性能参数主要有：流变学性能（黏度）、表面张力、粉末颗粒尺寸及其分布、孔隙率、颗粒形状、热导率、比热容、辐射特性、玻璃化温度、熔化温度等。一些主要材料参数对成形过程的影响如表 6.5-3。

表 6.5-3　材料性能对成形过程的影响

材料性能	主要作用
热吸收性	要求材料有较强的吸收特性，才能使粉体在较高的扫描速度下熔化和烧结
热传导性	材料的热导率小，可以减小热影响区，保证成形尺寸精度和分辨率，但成形效率低
收缩率	要求材料的相变体积收缩率和线胀系数尽量小，减少成形内应力和收缩翘曲
熔点	熔点低易于烧结成形，熔点高易于减少热影响区，提高分辨率
玻璃化转变温度	对于非晶体材料，影响作用与熔点类似
结晶温度与速率	在一定冷却速率下，结晶温度低、速率慢有利于工艺控制
反应固化温度和时间	用于反应固化成形原理，影响固熔点和结晶温度、速率
热分解温度	一般要求有较高分解温度
阻燃性和抗氧化	要求不易燃，不易氧化
弹性模量	模量高不易变形
熔体黏度	黏度小，易于黏结，强度高，热影响区大
熔体表面张力	表面张力大，不易黏结
粉体粒径	粒径大成形精度与表面光洁度低，不易于激光吸收，易变形。粒径小易于激光吸收，表面质量好，成形效率低，强度底，易污染，易烧蚀
粒径分布	合适的粒径分布有利于形成密堆积，减少收缩变形，粉体中应不含过细组分
颗粒形状	影响粉体堆积密度和表面质量、流动性和光吸收性，应尽量接近球形
堆积密度	影响收缩率和成形强度

1）材料的流变学性能（黏度）　在粉末材料的烧结过程中，材料受热升温且逐步熔融、发生变形、流动及最后成形。流体在流动时，各层流体之间互相摩擦的性质称为黏性。代表黏度对温度依赖性的是黏性流的活化能 E_μ，E_μ 愈大，则黏度受温度变化的影响便愈大。

对于非晶体聚合物材料，其烧结率与黏度成反比，因此，熔融黏度较低的聚合物适于 SLS 工艺。可以通过控制聚合物材料的分子量的方法来降低其黏度，使其适于 SLS 烧结工艺。

2）表面张力　在烧结过程中，随着大量的能量穿过粉末颗粒表面，粉末颗粒逐渐熔化。在颗粒上，熔化部分开始自由流动，以减少表面能。当两个颗粒之间形成颈部连接后，在表面张力的驱动下，两个颗粒融合在一起。对于一些材料，如金属，熔融材料的高表面能和低黏度，导致在烧结过程中颗粒在黏性流的带动下可以自由移动，并形成较大的聚集团块。聚集团块也可能发生在固体－液体两相系统中，此时，熔化部分没有完全浸润固体部分，而形成熔滴。大多数聚合物材料的表面张力远小于金属材料的表面张力，约为 0.03～0.05 N/m。

固体聚合物材料的表面张力数据大多采用外推法从熔融态时的数据得到。熔融态时的表面数据可以用悬滴法测定。悬滴法是一种简单、可靠、通用的测定聚合物的液态、熔融态表面张力及界面张力的方法。

3）粉末颗粒尺寸　粉末的颗粒尺寸影响粉床的初始空隙率以及烧结件的表面光洁度和特征精度、烧结率。粉末的颗粒尺寸取决于粉末的制造方法。干喷法可得到非常小的球形颗粒，机械研磨法则得到形状不规则的颗粒。

在 SLS 工艺中，粉末的颗粒尺寸限制了粉层的最小厚度及其表面光洁度。粉末的颗粒尺寸越小，则粉层的允许最小厚度也越小，较小的分层厚度有利于改善烧结件的侧面的精度。粉末的颗粒尺寸也影响铺粉效果。较大的颗粒尺寸导致粉层表面更加粗糙。但是，随着颗粒尺寸的减小，材料的比表面积显著增加，颗粒表面的摩擦力、附着力及其它表面力的作用将变得更加突出。如果粉末的颗粒尺寸非常小，则颗粒表面的静电会使粉末变得蓬松起来，增加铺粉难度。

粉末的颗粒尺寸还影响相邻颗粒之间的烧结率。Frenkel 模型表明：收缩率不仅与材料的黏度有关，而且与粉末材料颗粒的半径成反比。因此，随着粉末颗粒尺寸的减小，烧结率增加。

4）空隙率与颗粒尺寸分布　孔隙率 ε 表示粉末中孔隙体积所占份额的相对大小。它可以表示成粉末密度 ρ 与实体密度 ρ_s 的函数：

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \tag{6.5-5}$$

粉床的空隙率与粉末颗粒尺寸分布、颗粒的其他特征、

堆积方法有关。首先，粉末颗粒尺寸分布影响整体堆积效果，最理想的堆积密度对应于一个特殊的粉末颗粒尺寸分布。例如，当把具有单分散性分布的球状颗粒按照正交方式堆积时，它的堆积密度可以达到 60.5%（或者说孔隙率为 39.5%），如图 6.5-8 所示。

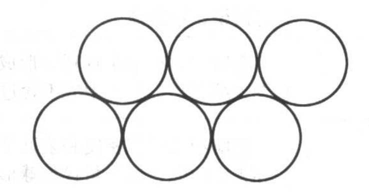


图 6.5-8　具有单分散性分布的球状颗粒按照正交方式堆积

但是，具有单分散性分布的球状颗粒，不管是按照正交方式堆积，还是按照其他方式堆积，在颗粒之间总存在一定体积的空隙存在。如果用更小的颗粒来填充这些空隙，那么得到的堆积空隙率将会减小。在一系列的试验中，McGeary 试图找到一种获得最小空隙率的方法。他将具有不同颗粒尺寸的粉末混合堆积在一起，并辅以振动的方法，以获得最密实的堆积。具体方法如下：首先将较大的颗粒堆积在一个容器中，振动容器以获得最小的空隙率；然后在容器中添加第二种颗粒尺寸稍小的粉末，振动容器以获得最小的空隙率；如此不断地添加颗粒尺寸更小的粉末并振动容器以获得最小的空隙率。试验表明，在一定粉末颗粒尺寸范围内，当颗粒尺寸分布越广，其堆积密度越大。

研究表明，粉床的初始空隙率减小，则最终烧结件的强度、密度和尺寸精度会增加。一种减小粉末空隙率的方法就是将具有不同颗粒尺寸的粉末按照上述方法混合在一起。

5）颗粒形状　Cutler与Henrichsen的实验研究表明，在颗粒尺寸相同的情况下，烧结颗粒形状粗糙的粉末，要比烧结球状颗粒粉末的速度快 5 倍左右。烧结率的增加是因为在接触点处的接触更紧密。粉末颗粒的形状不可由实验的方法确定，但可以用扫描电镜来观察。图 6.5-9 表示用扫描电镜观察得到的聚苯乙烯粉末颗粒形状。可以看出，粉末颗粒大小不一，形状各异，而且表面粗糙。

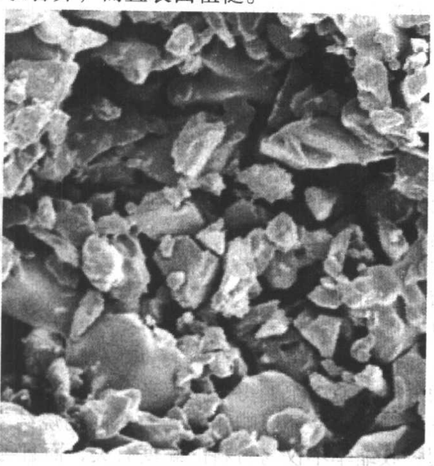


图 6.5-9　扫描电镜观察得到的聚苯乙烯粉末颗粒形状（200×）

6）热导率　热导率是表明物质的导热能力，即每单位温度梯度所容许通过的热流密度。

各种工程材料的热导率相差十分悬殊，金属材料的热导率较大，气体和蒸汽的热导率较小，而非晶体绝热材料和无机液体的热导率介于它们之间。热导率还随温度而变，大多数纯金属的导热系数随温度升高而减小，而气体与绝热材料的导热系数随温度升高而增加。对于同一种材料，一般地，它的固相比液相、液相比气相具有较高的导热系数，物质三相的导热系数随温度的变化如图 6.5-10 所示，作为一般规律，物质的导热系数随压力是增加的。聚苯乙烯的导热系数较小，约在0.10～0.15 W/（m·K）之间，且基本上与温度无关。

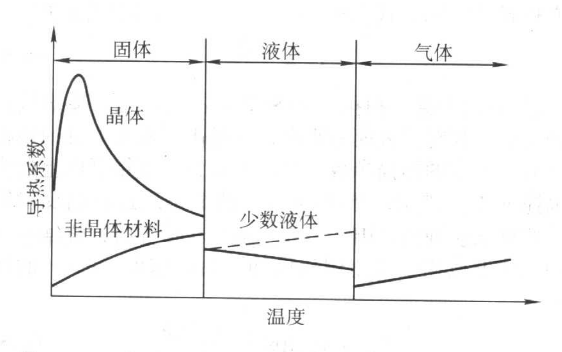


图 6.5-10　物质三相的导热系数随温度的变化关系示意图

在粉末材料的烧结过程中，经历了从固态到液态，又从液态回到固态的过程，导热系数的变化是比较复杂的。对于粉末系统来说，导热情况就更为复杂，它不仅与粉末材料的导热系数有关，而且与颗粒之间的填充气体的导热系数、粉末系统的孔隙率以及孔隙间的对流和辐射能量交换有关。在粉末系统中，热量是靠许多种机理传递的：经由固体颗粒内部、穿过固体颗粒间接触面、通过接触点附近气体层的热传导以及气体内部热传导，固体表面间以及邻近孔隙间的辐射传热等。工程计算中常用有效导热系数来综合表示各种导热的总体效果。在 SLS 工艺中，粉床有效导热系数随其温度和空隙率（或密度）而变。随着粉末的烧结，空隙率减小，它的有效导热系数随之增加，这是一个很重要的关系。

7）比热容　材料的比热容是指单位数量的材料，温度每升高（或降低）一度时所吸收（或释放）的热量。材料的比热容随温度的升高而升高。一般来说，如果材料比热较低，则加热流动和冷却固化的速度快，有利于 SLS 烧结成形。

8）辐射特性　热辐射是指物质对外发射波长 0.1～100 μm的“热射线”在空间传递能量的现象。热辐射所运载的能量称为“辐射热”，它是以光速推进、依靠光（量）子传递的能量。

任何物体都在连续向外发出辐射热，而且温度越高，辐射热越强。在 SLS 工艺中，激光就是一种辐射能极高的热射线，它的波长为10.6 μm。被烧结部分也不断地向外释放出热辐射，除部分被空间介质沿途吸收外，其余部分将落在周围其他一些物体上被吸收。

当热射线落在固体或液体表面上时，一部分能量将被表面反射，其余部分将被表面薄层里密集的分子所吸收。对于金属，这个表面薄层的厚度只有零点几微米，对于非导电体，也不过零点几毫米。玻璃、塑料如聚苯乙烯固体对可见光具有一定的透明性，但对红外辐射表现为强烈的吸收性。

材料的热辐射特性用发射率、吸收率、反射率和透射率等参数来表示，它们是辐射能波长、物体温度、表面状况、入射方向、反射方向以及物体成分的函数。但是，对这些热辐射参数的测量并不是一件简单的事情，通常将这些参数表示成材料成分和辐射能波长的函数。

材料的热辐射特性决定激光对材料的热作用能力。在SLS工艺中，粉床表面对激光能量的吸收率不仅与材料的热辐射特性有关，而且与粉床表面几何特征有关。随着激光的烧结，熔化的粉床表面在表面张力的作用下会变得光滑一些，从而可能会影响粉床表面的光学特性。试验研究表明，



粉床表面在熔化之后，对 CO_2 激光的吸收率稍微有所下降。Modest进一步的研究表明，对于非晶体材料，当温度高于玻璃态转化温度 T_g 之后，它的辐射特性不再变化。

9）玻璃化温度（T_g） 聚合物的玻璃化温度是指线型非结晶型聚合物由玻璃态（硬脆状态）向高弹态（橡胶弹性态）或者由后者向前者的转变温度。从超分子结构上看，就是大分子链段本身开始变形的温度。当温度高于玻璃化温度时，大分子链开始自由活动，但还不是整个分子链段的运动，这时表现出高弹性的橡胶性能；当温度低于玻璃化温度时，链段被冻结变成坚硬的固态或玻璃态。

10）熔化温度（T_m） 熔化温度是指结晶型聚合物从高分子链结构的三维有序态转变为无序的黏流态时的温度。对于低分子材料，熔化温度范围是非常窄的，约为0.2 K，有较明显的熔点；对于结晶型聚合物，只有达到其相应能级以后，晶体才边熔化边升温，T_m 正是晶体全部熔化完了时的温度；对于非结晶型高聚合物，从达到 T_g 开始软化，但从高弹态转变为黏流态的液相时，却没有明显的熔点，而是有一个向黏流态转变的温度范围 T_f。

5.4 分层参数

分层参数包括分层方向、分层厚度、扫描间距和扫描方式。

（1）分层方向

分层方向直接影响零件的成形精度。分层方向选择的一些简单原则：

1）尽量使尺寸精度要求高的面位于分层平面；

2）为了避免成形过程中产生大的应力变形，应尽量避免使较大的薄平面或悬臂结构位于分层平面；

3）尽量使大尺寸的面位于下部；

4）成形层数尽量少；

5）尽量使长轴位于推粉方向。

（2）分层厚度

分层厚度取决于成形件的精度要求、最大烧结厚度和铺粉厚度。分层太薄导致成形效率低，易于变形；分层太厚对精度影响太大，甚至丧失精度的意义，成形件的强度差。

随铺粉厚度的增加，铺粉密度下降，烧结深度和密度必然降低。为了保证足够的层间连接强度，铺粉厚度要尽量小。但层厚过薄，一方面使铺粉困难，另一方面容易使有机树脂被烧掉，失去黏结剂。最佳铺粉厚度要在综合考虑粉材性能、颗粒度、成形质量及加工效率的基础上确定。

（3）扫描间距

扫描间距是指相邻两个扫描矢量之间的距离，它是用来调节烧结平面上的扫描线密度的量。扫描间距小，则水平方向的分辨率高，但间距过小（如 < 1/2 烧结宽度），则没有实际意义，反而影响加工效率，加大热应力。扫描间距太大，则分辨率变差，成形精度低，如果扫描间距大于烧结宽度，则不能烧结。

（4）扫描方向

在成形过程中，扫描方向的选择是一个非常关键的问题。扫描方向决定了每层的扫描矢量数，并影响成形过程的应力分布和加工效率。基本的扫描方向有两种：X 方向扫描和 Y 方向扫描。对于有长轴结构的零件，如果使扫描方向沿着长轴方向，则扫描矢量数少，成形效率高，但是在扫描方向上各点处的烧结不均匀；如果使扫描方向沿着短轴方向，则扫描矢量数多，成形效率低，但是在扫描方向上各点处的烧结均匀。

为了改善烧结件内部的应力分布，也可以用 X 方向、Y 方向轮流交替的方式扫描，对于有对称结构的零件，采用这样的扫描方式，可以使应力分布相对均匀，变形小，增加烧结间的强度。对烧结件的强度试验表明：在垂直于扫描方向上的拉伸强度大于在平行于扫描方向上的拉伸强度。因此，交替改变扫描方向，可使得烧结件在两个方向上具有均匀的强度。但是，在有些情况下，交替改变扫描方向是不利的。如图6.5-11所示，零件 A 在两个方向上都是轴对称的，在此情况下交替改变扫描方向是有利的，因为在同一方向上（x 方向或 y 方向）的所有扫描矢量的长度相同；而零件 B 的形状是不规则的，在此情况下交替改变扫描方向是不利的。对于零件 B 来说，在 y 方向上扫描效果较好，这是因为，在 x 方向上，零件边缘部分的扫描矢量变得非常短，较短的扫描矢量使得相邻扫描之间的时间间隔较短，从而热损失也较小，因此，在 b 点处的表面最高温度高于在 a 点处的表面最高温度。某文献详细讨论了在粉末表面上的能量输入的计算，它表明能量输入与扫描速度、光斑大小、激光功率、扫描间距之间的关系。

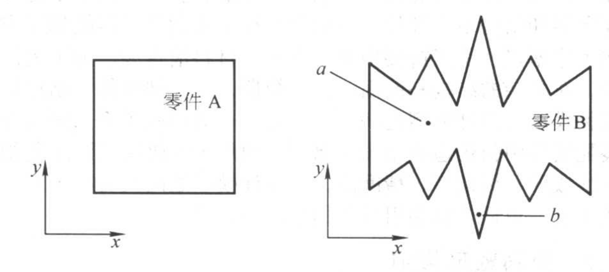


图6.5-11 改变扫描方向对烧结影响的例子

6 激光选区烧结快速成形工艺的应用

6.1 设计和装配验证

在现代产品设计中，设计手段日趋先进，计算机辅助设计使得产品设计快捷、直观，但由于软件和硬件的局限，设计人员仍无法直观地评价所设计产品的效果和结构的合理性以及生产工艺的可行性。快速成形技术为设计人员迅速得到产品样品、直观评判产品提供了先进的技术手段。图6.5-12是北京隆源自动成形系统有限公司为某摩托车生产厂新型250摩托车制作的覆盖件样件，包括油箱、前后挡板、车座和侧盖等共13件。采用SLS成形技术和工艺，仅用12天就完成了全部制作。设计人员将样件装在车体上，经过认真评价和反复比较，对产品的外观做了重新修改，达到了理想状态。这一验证过程，使设计更趋完美，避免了盲目投产造成的浪费。

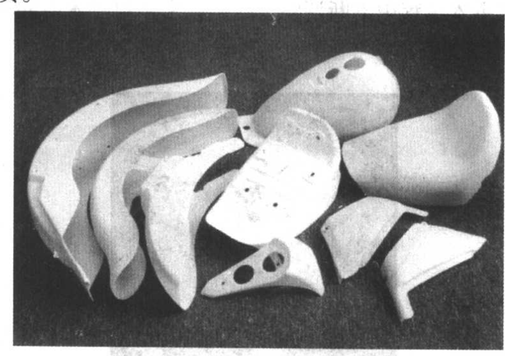


图6.5-12 摩托车覆盖件样件
（北京隆源公司提供）

制出样品实件，进行装配实验。图6.5-13是某公司委托北京隆源自动成型系统有限公司加工的传真机外壳及电话。用户不仅要进行外观评价，而且要将传真机的内部部件装入样件中，进行装配实验和结构评价。该公司首先选择传



图 6.5-13 传真机 BABS 塑料组装样件

（北京隆源公司提供）

统加工方法，分块加工，手工粘接，仅加工一套电话听筒就耗资肆仟元，耗时 20 天。预计制作传真机样品需 2 个月，费用为 2.5 万元。而用快速成形技术，仅用 15 天就将该产品一套共六件交给委托方。用户在装配实验中发现了 7 处装配干涉和结构不合理处。将前后两种方法相比，传统加工方法工序繁多，手工拼接费时、费力，材料浪费大、加工周期长。对复杂的结构和曲面，加工粗糙，尺寸精度低，制作的实物模型与设计模型之间不能建立一一对应的关系，因而在装配实验中很难检查出设计错误。而用 SLS 快速成形工艺则一次成形、周期短、精度高，与设计模型之间具有一一对应的关系，更适合样品组装件的生产和制造。

6.2 外科整形模拟

SLS 技术被用于制作人体解剖模型和外科手术的设计已给人类带来巨大的利益。它不仅可以在手术前直接为外科医生提供患者病体的三维实体，也可作为手术示范模型。医生还可利用 SLS 模型对手术的实际结果与预期效果之间的吻合程度进行分析。

人体的骨骼和内部器官具有极其复杂的内部组织结构，要真实地复制人体内部的器官构造，反应病变特征，快速成形几乎是惟一的方法。以医学影像数据为基础，利用 RP 方法制作人体器官模型有极大地应用价值，作为医疗专家组的可视模型，进行模拟手术，特殊病变部分的修补（颅骨损伤、耳损伤等）。

图 6.5-14 是一个陈旧性颧骨颧弓粉碎性骨折的例子。病人颧骨粉碎性骨折，面部畸形，张口受限，眼球内陷。按传统的治疗方法，是根据 CT 影像数据直接进行手术，虽然一般情况下也能达到预定的手术结果，但是由于人体面部骨骼的复杂性，很难完全从影像数据制定精细的手术方案，而必须在手术过程中不断调整。这样一来不仅手术时间长，而且不能达到最佳手术效果。

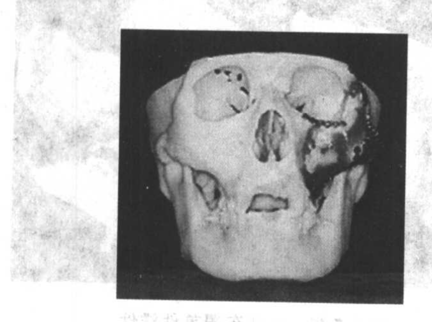


图 6.5-14 颧弓骨折的模拟手术模型

（北京隆源公司提供）

如图，将 CT 断层数据进行三维重建，再经快速成形制作出与病体特征一致的头骨模型。实物模型较之计算机三维模型更直观、更便于医生之间进行充分的交流，确定手术方案。此外，由于 SLS 激光成形的模型与骨质具有非常相似的加工性能，因此可用医用模型进行模拟手术。图 6.5-15 是在病体模型上进行模拟手术的情况。

将三维头模与三维 CT 影像对照，沿原骨折线截开，参照健侧颧骨颧弓形态拼对骨折片，恢复颧骨的外形弧度、前突度和面侧方宽度，分别在颧额缝、眶下缘、颧颞缝、颧牙槽嵴的骨折线上弯制微型、小型钛板（见图 6.5-15）作手术中固定用。实际手术中采用半冠状切口、睑缘下切口和口内移性沟切口以完整显露颧骨、颧弓及骨折线。参照三维头模复位各骨折片，恢复颧骨的连接，以预成钛板进行固定。



图 6.5-15 颧骨粉碎性骨折的钛板件制作

（北京隆源公司提供）

由于手术前手术方案准备充分，还进行了模拟手术，制作了手术中实际应用的小型钛板，使手术进展得非常顺利，手术时间缩短了一半，病人和医生对手术结果都非常满意。

采用 SLS 技术不仅可以制造出精确的模型和原型，还可以成形具有可靠结构的金属零件作为直接功能件使用。由于其具有诸多优点，如粉末选材广泛、适用性广，可直接烧结零件等，因此在现代制造业中受到越来越广泛的重视。

近二十年来 SLS 技术得到了飞速发展，获得了良好的应用效果，但作为一项新兴制造技术，尚处于一个不断发展、不断完善的过程之中。目前，SLS 技术还有很大的发展空间：

1）成形工艺和设备的开发与改进，以提高成形件的表面质量、尺寸精度和力学性能；

2）新材料成形机理、成形性的研究与开发，为SLS提供具有良好综合性能的烧结粉末材料及形成快速成形材料的商品化；

3）探索 SLS 技术与传统加工、特种加工等技术相结合的多种加工手段的综合工艺，为快速模具、工具制造提供新的技术手段；

4）后处理工艺的优化。利用 SLS 虽可直接成形金属零件，但成形件的力学性能和热学性能还不能很好满足直接使用的要求，经后处理后可明显得到改善，但对尺寸精度有所影响，这就需要优化设计现有的后处理工艺以提高综合质量。

SLS 技术的发展，新工艺、新材料的不断出现，势必会对未来的实际零件制造产生重大影响，对制造业产生巨大的推动作用。

快速制造技术以及各行各业高技术的迅猛发展，应用范围的扩大，一方面，人们对制件的性能和精度提出了更高的要求，对各种新材料性能的要求更加苛刻。塑料、金属、陶瓷等单一材料一般满足不了其特殊的性能要求，由此提出了采用复合材料、功能梯度材料、智能材料等新型材料，这些



新型材料一般由两种或两种以上材料组成，其性能优于单一材料的特性。这些新型材料的性能可根据人们对材料的性能需要，从已有的各种单一材料中配制而成。人们希望能够快速、经济地研究这些新型材料所表现的特性，从而找出最优的配方。由于 SLS 技术可以分层制造出具有任意复杂结构的高分子、陶瓷、金属及其复合材料制件，可以用它来研究新型材料及其制件的各种特性。因此，SLS 技术也是研究新型材料选材的非常有潜力的手段。

目前，由于消费的多样化、市场的全球化、高科技发展的需要、世界范围内的激烈竞争，以及国际社会对人类赖以生存的资源和环境的高度重视，对制造业的发展提出了更高的要求和更加严厉的制约条件，制造业面临着新的发展机遇和更加严峻的挑战。未来的制造技术将进一步向系统化、智能化的方向发展。在产品的设计和制造领域应用 SLS 技术，能显著地缩短产品投放市场的周期，降低成本，提高质量，增强企业的竞争能力。

微型机械是制造业的前沿领域，对国民经济和国防科学技术的发展有深远的影响。目前微机械加工主要采用基于硅的微细加工技术和 LIGA 技术，采用前者制造三维微机械比较困难，采用后者虽然可以制造三维微结构，但制造带有曲面的三维微机械比较困难，并且工艺过程复杂，成本极高。而采用快速成形的方法制造微机械没有这些限制，可以制造形状复杂的微结构。SLS 技术具有可加工材料范围广泛的独特优点，用 SLS 技术制造微机械为制造多种材料的三维微机械，并在微机械中进行多种材料的集成提供了一条有效的途径，具有广阔的应用前景。

7　激光选区烧结典型设备

（1）美国3D Systems 公司

SLS 工艺最早由美国 DTM 公司商品化。2001 年，3D Systems公司并购DTM公司后，SLS 设备进入到3D Systems公司的产品序列。3D Systems的 SLS 设备已经发展到第 5 代，目前的型号是Sinterstation HQ 和Sinterstation HQ HS，分别使用30 W和100 W的射频 CO_2 激光器，二者的差别主要体现在成形速度上。

Sinterstation系列产品均采用双缸双方向铺粉，成形室为半密闭结构，成形过程中加以惰性气体（氮气）保护（如图 6.5-16 所示）。采用的精密温度控制技术可以最大限度的减少零件烧结过程中的变形。3D Systems的 SLS 设备的主要特点是一机多材，一台设备使用不同的工艺既可直接成形尼龙功能类零件、消失铸造熔模及树脂砂芯，也可间接成形金属零件和类似橡胶的零件等。图 6.5-17 为美国宇航局 NASA 喷气实验室采用3D Systems公司的Vanguard si² SLS System设备为太空制作的DuraForm零件。



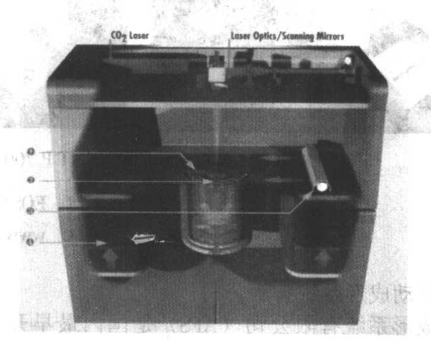
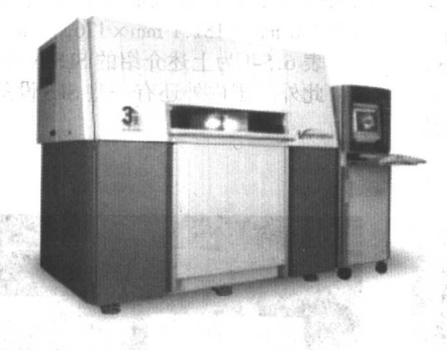


图 6.5-16　Sinterstation2500 的外形图和工作部分示意图

（原 DTM 公司提供）



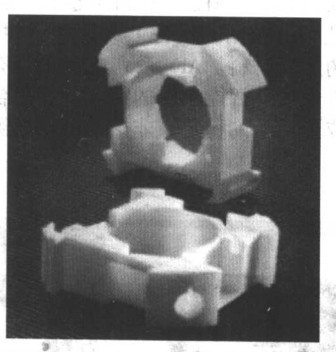
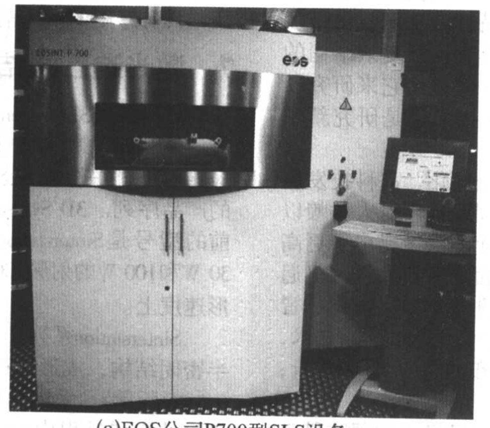


图 6.5-17　Vanguard si² SLS System成形设备及制造的太空零件

（来自www.3dsystems.com）

（2）德国 EOS 公司

EOS 公司自 1989 年进入 RP 领域，一直专注于 SLS 设备的研发。目前共有 5 种型号的产品。EOS 设备的最大特点是一机一材，其 EOSINT P 系列产品针对热塑性树脂材料的成形；EOSINT S 型针对铸造树脂砂的成形；EOSINT M 型适用于金属零件的直接成形。一机一材的好处是可以使设备结构最大限度地适应材料和工艺要求，利于工业上的连续生产。EOS 设备采用双向下撒料式供粉，铺粉系统为刮板式结构，成形室及正向运动活塞为可拆卸结构，使正向成形空间最大化。EOSINT P700 和 EOSINT S750 均采用双激光双振镜扫描结构，在保证光斑尺寸满足成形精度的前提下使成形面积达到 700 mm × 380 mm，是目前成形尺寸最大的设备。图 6.5-18a 是 EOS 公司典型设备 P700，图 6.5-18b 是使用 EOSINT P700 设备得到的塑料成形产品。


(a)EOS公司P700型SLS设备

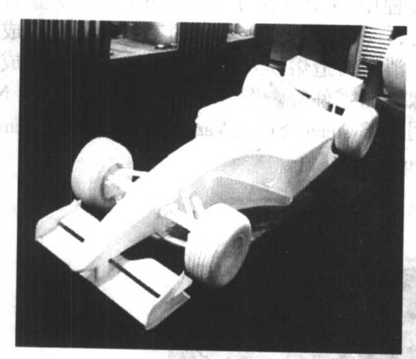
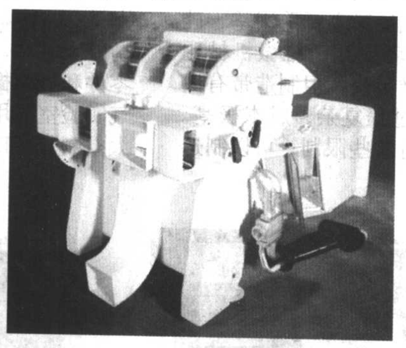
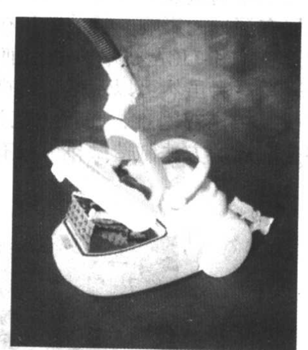



(b)采用EOSINT P 700 系列设备制造的塑料成形产品

图 6.5-18 EOS 公司设备及成形产品
（来自 www.eos_gmbh.de）

(3) 北京隆源自动成形系统有限公司

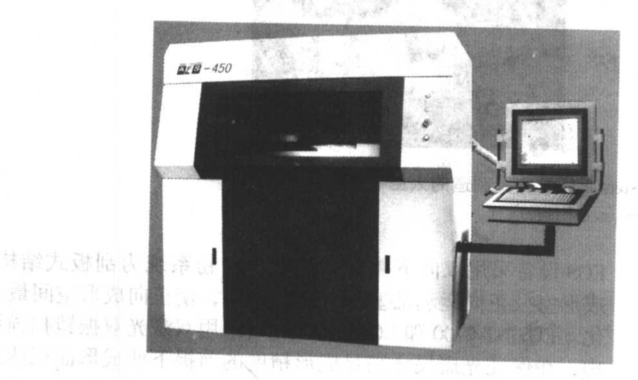
北京隆源自动成形系统有限公司（AFS）是国内最早开发 SLS 技术的企业。目前 AFS 系列 SLS 设备在国内具有很高的市场占有率。AFS 系列成形机有 3 个规格型号，其中 AFS－520S 机型目前是世界上采用单缸铺料、单视场振镜扫描粉末激光选区烧结最大的机型。AFS 系列机型也是一机多材，采用不同的成形工艺，可在同一设备上成形塑料树脂、精铸可消失熔模和铸造树脂砂材料。AFS 系列成形机具有操作简单、运行稳定、无人值守、智能响应的特点。其铝合金型材的刚性机身保证了成形尺寸的稳定，非接触温度场测温控制有效地保证了烧结工艺，多种情况的自动报警和关机有效地保证了设备和人员的安全。图 6.5-19 为该公司 AFS－450 设备及制造的壳型。

(4) 武汉滨湖机电技术产业有限公司

图6.5-20 为武汉滨湖机电技术产业有限公司生产的 HPRS粉末烧结快速成形设备及其制造的排气管蜡模（尺寸为 342.0 mm × 187.1 mm × 176.3 mm，用时 7.5 h）。

表 6.5-4 为上述介绍的 SLS 设备型号和性能表。

此外，国内外还有一些 SLS 设备制造厂家。



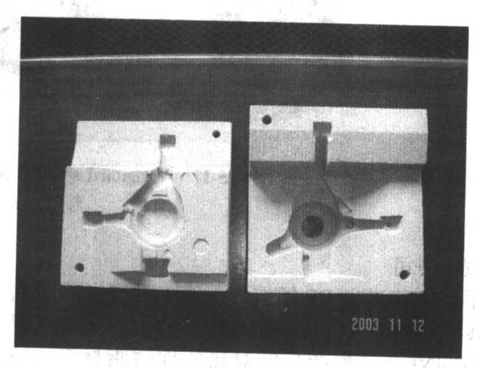
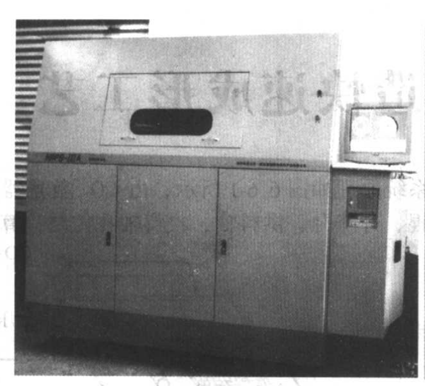


图 6.5-19 北京隆源公司 AFS－450 设备及壳型
（北京隆源公司提供）





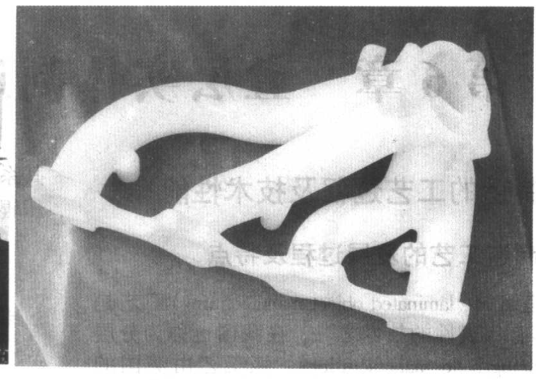


图 6.5-20　HPRS 设备及其制造的排气管蜡模
（武汉滨湖机电公司提供）

表 6.5-4　SLS 设备型号一览表

生产商	设备型号	成形空间尺寸/mm	激光器	最大扫描速度	成形材料
3D Systems	Sinterstation HIQ Sinterstation HIQ HS	380 × 330 × 457 380 × 330 × 457	30 W 射频 CO_2 100 W 射频 CO_2	5 m/s 10 m/s	尼龙、玻纤增强尼龙，聚碳酸酯、聚苯乙烯、Cu 聚酰胺复合物、铸造树脂砂、树脂包覆的金属粉末
	Vanguard si^2 SLS System	370 × 320 × 445	25 ~ 100 W 射频 CO_2	7.5 m/s① 10 m/s	
EOS	EOSINT P380 EOSINT P700	340 × 340 × 620 700 × 380 × 580	50 W 射频 CO_2 双 50 W 射频 CO_2 双振镜	5 m/s 5 m/s	尼龙、玻纤增强尼龙、铸造聚苯乙烯
	EOSINT S750	720 × 380 × 380	双 50 W 射频 CO_2	3 m/s	铸造树脂砂
	EOSINT M250Xtemded EOSINT M270	250 × 250 × 380 250 × 250 × 215	200 W 射频 CO_2 200 W Yb 光纤	3 m/s 3 m/s	铜基合金和钢 不锈钢、工具钢、铜基合金和镍基合金
北京隆源公司	AFS – 360 AFS – 450 AFS – 520	360 × 360 × 500 450 × 450 × 500 520 × 520 × 500	50 W 射频 CO_2 50 W 射频 CO_2 50 W 射频 CO_2	4 m/s 6 m/s 6 m/s	尼龙、ABS、聚苯乙烯、铸造树脂砂
武汉滨湖公司	HRPS – ⅡA HRPS – ⅢA HRPS – Ⅳ	320 × 320 × 450 400 × 400 × 450 500 × 500 × 400	CO_2 CO_2 CO_2		HB 系列粉末材料 HB 系列粉末材料 HB 系列粉末材料
北方恒利公司	HLP – 3501	350 × 350 × 380	30 W CO_2	2 m/s	精铸蜡粉 PS 粉

① Vanguard si^2 SLS System 具有两种扫描模式：标准光束传输系统下最大扫描速度为 7.5 m/s，BDS 高速模式（Celerity™）下最大扫描速度为 10 m/s。

编写：冯　涛（北京隆源自动成型系统有限公司）
越保军（北京隆源自动成型系统有限公司）
刘　筠（北京隆源自动成型系统有限公司）

第 6 章　叠层实体制造快速成形工艺

1　叠层实体制造的工艺过程及技术性能

1.1　叠层实体制造工艺的发展过程及特点

叠层实体制造LOM（laminated object manufacturing）工艺是快速原型技术中具有代表性的技术之一，在我国也称为分层实体制造 SSM（slicing solid manufacturing）。该工艺由美国的Michael Feygin于 1985 年申请了专利，并由Helisys Inc公司于1991 年推出LOM 1015、LOM2030两种型号的成形机，采用步进电机驱动，其成形零件最大平面尺寸分别为：250 mm×300 mm和 550 mm×815 mm。Helisys Inc 公司 1996 年又推出了采用交流伺服电机驱动的增强型号：LOM1015P、LOM2030H。

由于 LOM 工艺技术特点明显，国际上很快有类似的工艺出现。如日本 Kira 公司于 1995 年推出 SC 成形机、瑞典Sparx公司于1996 年推出 Sparx 成形机和新加坡 Kinergy 精技私人有限公司于 1996 年推出的ZIPPY成形机等。此外，美国Dayton大学的A. J. Lightman、D. A. Klosterman和苏格兰的Dundee大学（采用大功率 CO_2 激光切割叠层钢板）在 LOM 工艺研究与应用上均做了重要的工作。

华中科技大学快速成形中心是我国开展快速成形技术研究较早的单位之一。开发的叠层快速成形技术采用无拉力叠层材料送进装置、浮动外热式热压装置和四柱导向双丝杆传动工作台。目前有HRP－IIB和HRP－IIIA两种型号，由武汉滨湖机电技术产业有限公司负责产品生产销售。

清华大学激光快速成形中心于 1992 年开始自行研制M－220 多功能 RP 工艺试验机。并于 1993 年 6 月在M－220上首先实现叠层实体制造技术。1994 年 5 月通过了国家教育委员会组织的鉴定。M－220上的叠层实体制造工艺采用与Helisys公司基本相同的造型过程，利用国产的热熔胶涂覆纸，国产40W连续 CO_2 激光器。其 *XY* 运动机构采用的是一体化导轨的悬臂结构，由步进电机驱动。此后，在M－220的基础上开发了分层实体造形系统 SSM－500 和 SSM－1600，并将LOM 工艺集成到多功能快速成形制造（M－RPMS）系统上。上述成形系统由北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司实现商品化，其推出的产品为 SSM－800 和 M－RPMS－Ⅲ。这些产品都采用了多项独特的技术，如：激光功率与扫描速度实时匹配技术、热压－扫描一体化集成机构以及跟踪式排烟装置等。

在这些公司中，Helisys Inc.公司的 LOM 工艺最具代表性。其系统原理如图 6.6-1 所示，由 CO_2 激光器及扫描机构、热压辊、升降台、供料轴、收料轴和控制计算机等组成。

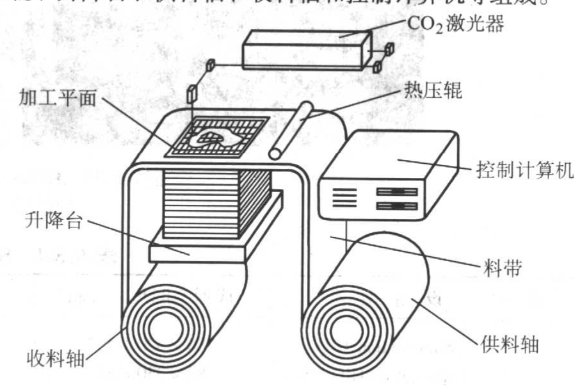


图 6.6-1　叠层实体制造的系统原理图

LOM 的成形工艺基于激光切割薄片材料、由黏结剂黏结各层成形，其具体过程如图 6.6-2 所示。

1）料带移动，使新的料带移到工件上方（图 6.6-2a）。

2）工作台上升，同时热压辊移到工件上方；当工件顶起新的料带，并触动安装在热压辊前端的行程开关时，工作台停止移动；热压辊来回碾压新的堆积材料，将最上面的一层新材料与下面的工件黏结起来，添加一层新层（图 6.6-2b）。

3）系统根据工作台停止的位置，测出工件的高度，并反馈回计算机。

4）计算机根据当前零件的加工高度，计算出三维形体模型的交截面。

5）交截面的轮廓信息输入到控制系统中，控制 CO_2 激光沿截面轮廓切割（图 6.6-2c）。激光的功率设置在只能切透一层材料的功率值上。轮廓外面的材料用激光切成方形的网格，以便在工艺完成后分离。

6）工作台向下移动，使刚切割的新层与料带分离（图 6.6-2d）。

7）料带移动一段比切割下的工件截面稍长的距离，并绕在收料轴上（图 6.6-2a）。

8）重复上述工艺过程，直到所有的截面都切割并粘接上，所得到的是包含零件的方体。零件周围的材料由于激光的网格式切割，而被分割成一些小的方块条，能容易地从零件上分离，最后得到三维的实体零件。

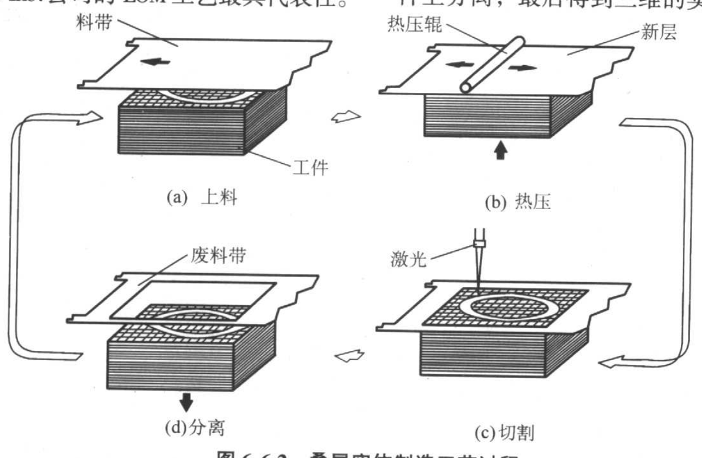


图 6.6-2　叠层实体制造工艺过程



从叠层实体制造的工艺过程可以看出其具有的特点：

1）用 CO_2 激光进行切割；

2）零件交截面轮廓外的材料用打网格的办法使之成为小的方块条，便于去除；

3）采用成卷的带料供材；

4）行程开关控制加工平面；

5）热压辊对最上面的新层加热加压；

6）先进行热压、黏结，再切割截面轮廓，以防止定位不准和错层问题。

日本Kira公司的 SC 成形机与 LOM 有所不同，其工艺称为选择性黏结和热压工艺（selective adhesive and hot press process，SAHP），如图 6.6-3 所示。与LOM工艺的不同之处在于：

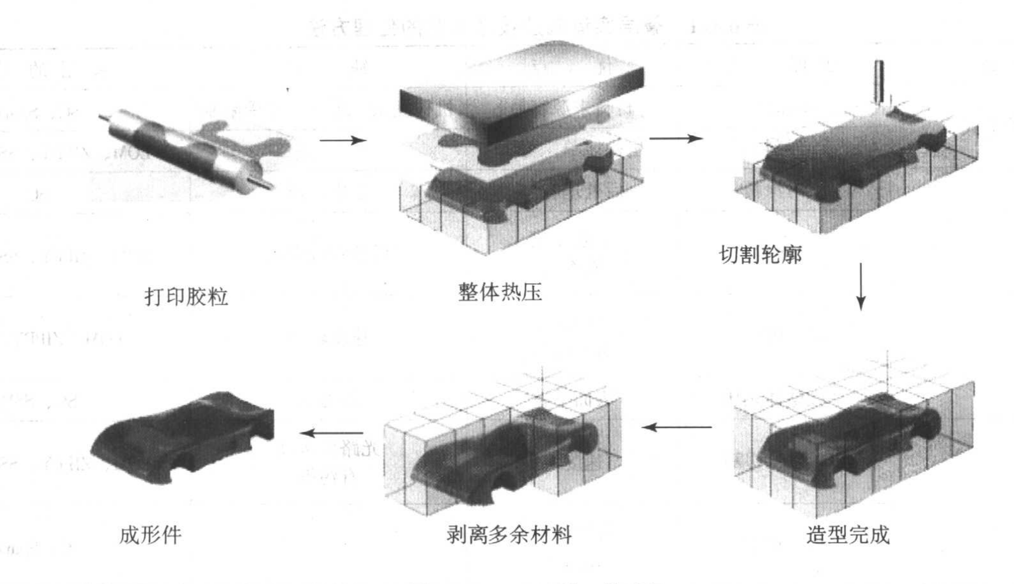


图 6.6-3　SAHP 的工艺过程

1）材料不同　SAHP 可用普通纸造型，颗粒状黏胶由打印机打印在纸上的截面部分，仅在截面内施胶，因而只有零件截面部分粘接，其余部分是分离的。

2）用刻刀切割轮廓　SAHP 用一把机械刻刀，沿零件截面轮廓，切割刚粘上的新层。用刀切割一方面不产生烟，防止污染环境；另一方面省去激光器，简化系统。消除了因对焦不准而导致失火的危险。

3）热压采用热压平板整体热压　LOM 工艺是用热压辊辗压最上层的新层，而 SAHP 是用一块热平板，由上向下，整体施压，将最上层的新层粘在已成形的工件上。

SC 成形系统包括 PC 计算机、影印机、纸张校准机、热压机和机械切割机各一台，如图 6.6-4 所示。

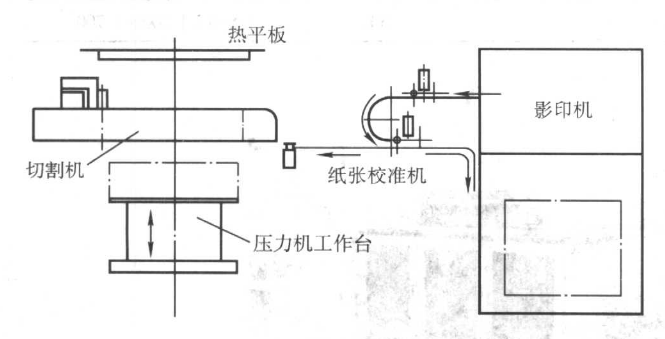


图 6.6-4　日本 Kira 公司 SC－50 系统图

瑞典 Sparx 公司的 Sparx 是一种简易的叠层实体制造工艺，其开发的目的是为了提供廉价的 RP 设备，使用户可以花很少的钱就享受到 RP 技术的优越性。Sparx的工艺采用平板绘图仪，用刻刀切割零件轮廓和定位孔，手工粘贴层面。Sparx所采用的造型材料厚度较厚。零件的台阶现象明显。

综合上述，叠层实体制造工艺主要以纸作为造型的材料，采用卷料或单张纸供料。后者的供纸机构较复杂，且由于预先裁好的尺寸不一定适合零件的尺寸，因此，造成材料较大的浪费。卷料供料装置较简单，而且运行可靠，不会出现夹层的问题，对纸张的要求低。

造型材料表面涂覆的黏结剂、热熔胶，可以是造型时实时涂覆或者预涂覆。当采用实时涂覆方式时需要一套影印设备和特殊的影印墨粉，并需要二次定位，即影印时的定位与切割时的定位。但后处理工序，去除多余材料较简单，特别是对于零件上平行于离散面的表面。预涂覆是采用涂布机流水线涂布，效率高，成本较低。而且成形设备简化，不需要二次定位，工艺也相应简化。但由于材料所有表面都有胶，多余部分也被粘接。零件加工完后，去除它们比较费时。而对于零件上平行于离散面的表面，需要在切割层面时打上较密的网格，以便分离。

轮廓切割可采用 CO_2 激光或刻刀。刻刀切割轮廓的特点是没有污染、安全，系统适用于在办公室环境工作。激光切割的特点是能量集中，*XY* 扫描机构没有切割力，切割速度快；但有烟，有污染，光路调整要求高。

上述不同工艺的处理方法总结见表 6.6-1。

1.2　叠层实体制造系统的主要性能指标

表 6.6-2 列出了目前国内外几种叠层实体制造系统的主要技术性能指标。就成形零件的尺寸而言，叠层实体制造工艺较其它快速成形工艺具有较大的优势，其成形零件最大可达 1 m 以上。这是因为叠层实体制造工艺无需进行层内的材料堆积，而只需切割零件截面轮廓。零件截面的面积越大，轮廓线越短，单层制造的速度就越快。因此，叠层实体制造比较适合制造实心、大截面零件。



表6.6-2中的叠层实体制造系统都属中型和大型快速原型制造系统。其中，中型制造系统的成形零件最大尺寸在500 mm以下，如LOM1015，KSC－50，ZIPPY－I，HRP－IIB等；而大型制造系统的成形零件尺寸的最大尺寸在500 mm以上，如LOM2030，SSM－800，SSM－1600，ZIPPY－II，HRP－IIIA等。

叠层实体制造系统的成形精度在0.1～0.2 mm，在快速成形技术中属中等水平。由于成形材料（一般为纸）限制，进一步提高精度比较困难。

1.3 叠层实体制造设备

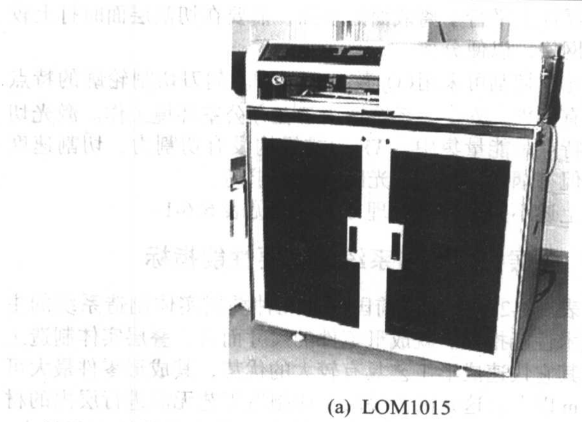
图6.6-5为Helisys公司的LOM设备外形图，其中图6.6-6a为第一台商品化LOM设备LOM 1015，图6.6-6b为LOM2030E。

表6.6-1 叠层实体制造技术工艺的处理方法

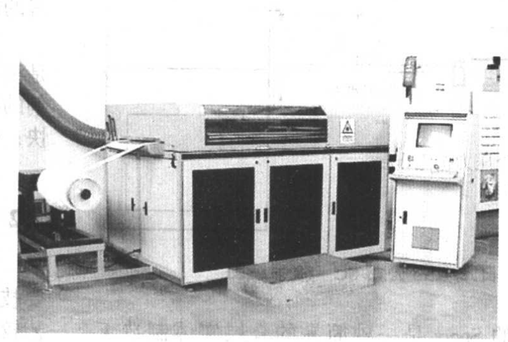
工艺问题	处理方式	优点	缺点	采用的工艺
成形材料供料的形式	单张纸	材料来源容易	机构复杂，零件尺寸受限制	SC、Sparx
	卷料	机构简单，可靠		LOM、ZIPPY、SSM、HRP
施胶方式	实时涂覆	后处理容易	二次定位	SC
	预涂覆	工艺简化 效率高	后处理较费时	LOM、ZIPPY、SSM、HRP
热压方式	辊子碾压	压力小 机构简单	速度较慢	LOM、ZIPPY、HRP
	平板整体热压	表面平整	压力大	SC、SSM
轮廓切割方式	CO_2 激光切割	速度快	光路要求高 有污染	LOM、ZIPPY、SSM、HRP
	刻刀切割	系统简单 无污染		SC、Sparx

表6.6-2 叠层实体制造成形机技术性能

设备型号	零件尺寸长（×宽×高）/mm	成形精度/mm	切割速度/$mm \cdot s^{-1}$	激光功率/W	设备尺寸（长×宽×高）/mm
LOM1015	254×370×355	±0.1	380	25	
LOM2030	813×559×508	±0.1	508	50	2 060×1 410×1 400
KSC－50	400×280×300	±0.2			2 130×1 000×1 400
ZIPPY I	400×300×340	±0.2	650	50	1 250×1 000×1 800
ZIPPY II	1 200×750×550	±0.2	650	50	2 510×1 860×2 000
SSM－1 600	1 600×800×700	±0.2	500	2×50	
SSM－800	800×500×470	±0.1	500	50	1 600×910×1 460
HRP－IIB	450×350×350	±0.1		50	1 750×980×1 500
HRP－IIIA	600×400×500	±0.1		50	1 860×1 100×1 700



(a) LOM1015



(b) LOM2030E

图6.6-5 Helisys公司的设备外形图



图 6.6-6 为清华大学激光快速成形中心与北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司合作开发的 SSM-1600 大型分层实体制造系统，此大型快速成形系统不同于传统叠层实体制造系统，采用先进的双激光扫描并行加工方式，为世界上最大的叠层实体制造工艺快速成型设备，可成形零件的最大尺寸为 1 600 mm × 800 mm × 700 mm（长 × 宽 × 高），智能确定两个激光器切割分界线，以保证两激光器同时完成每一层的切割工作。此外采用“预切割原理”，大大减少大型 LOM 件的变形（中国发明专利），适用于制造大型快速原型。

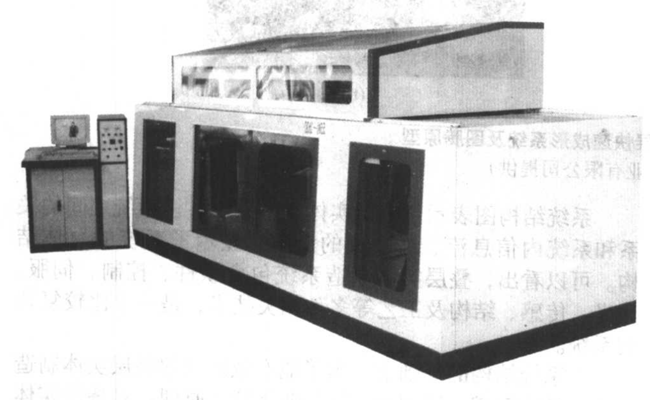


图 6.6-6　SSM-1600 大型分层实体制造系统
（清华大学激光快速成形中心提供）

北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司还开发了 SSM－800叠层实体制造设备。图 6.6-7 为采用该设备制造的原型照片。

图6.6-8a 为武汉滨湖机电技术产业有限公司生产的 HRP－IIIA 型薄材叠层快速成形系统，图 6.6-8b 为采用该系统制造的图腾原型。

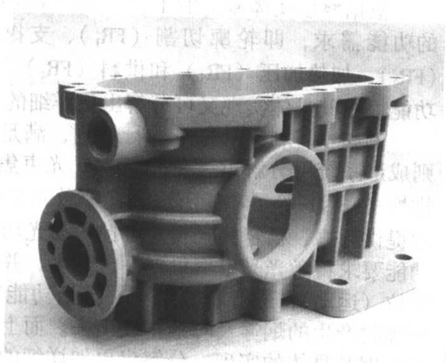
Helisys 公司 2001 年已经倒闭，该公司主要股东即LOM工艺发明人 Michael Feygin 又重新组建了一个新的公司称为 Cubic Technologics公司。由于美国3D Systems和美国 Stratasys 公司的激烈竞争，Cubic 公司 2001 年和 2002 年分别仅售出 2 台设备。

虽然 LOM 工艺在 RP 市场中曾经位居第二位，但由于以下原因，其在 RP 大家族中的地位正在日益下降：

1）成本价格上无法与基于喷射技术的 RP 工艺竞争。这主要是 CO_2 激光系统增加了其设备成本和运行成本所致。

2）精度上无法与光固化工艺相竞争。商品化运行稳定的 LOM 设备的精度均在 0.15 ~ 0.25 mm 之间，远达不到光固化工艺的水平；光固化工艺虽然采用价格昂贵的紫外激光，但总的来说设备结构简单且成形件精度高。

3）材料浪费较大。这是 LOM 工艺本身所决定的，每一层中根据成形件的分层图形，一般仅有 50% 以内的薄材得到利用，其余部分均被用作边框和被切为方格块而无法重新利用。



(a)大型(550mm)减速箱RP原型



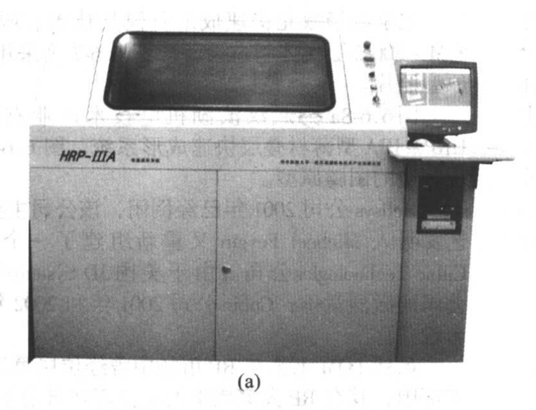
(b)电奶锅RP原型



(c) 艺术品RP原型

图 6.6-7　采用 SSM－800 制造的 RP 原型
（北京殷华公司提供）





(a)



(b)

图 6.6-8　HRP－IIIA 型薄材叠层快速成形系统及图腾原型

（武汉滨湖机电技术产业有限公司提供）

4）LOM 设备系统比较复杂，工作稳定性比不上基于微滴喷射技术的 RP 系统。此外，切割薄材也会造成一定的污染。

5）LOM 原型的尺寸及形状稳定性差，特别是在潮湿的环境下。

2　叠层实体制造系统的功能与总体结构

2.1　系统功能

叠层实体制造系统是一种典型的机械电子学（机电一体化）产品。为了实现叠层实体制造工艺的要求，以采用激光切割的成形系统为例，其系统可分成五个部分，如图 6.6-9 所示。

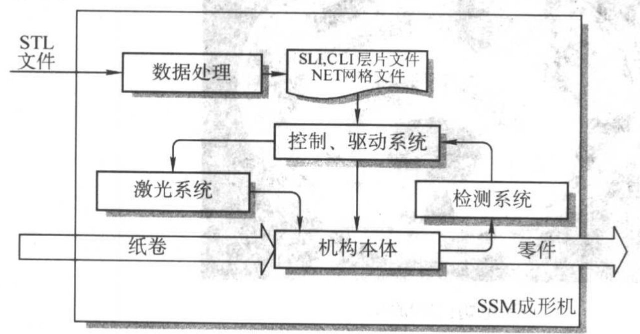


图 6.6-9　叠层实体制造系统的结构图

五部分的功能为：

1）数据处理　输入零件 STL 文件数据，对数据进行检验、修正、分层和网格填充的处理。生成分层文件（.SLI，.CLI）和网格文件（.NET），分层文件记录了零件截面的轮廓信息，而网格文件记录了层片加工中网格部分的信息。

2）控制、驱动系统　读入零件的分层文件（.SLI，.CLI）和网格文件（.NET），根据工艺要求产生控制指令和切割路径指令。在指令的驱动下，驱动激光聚焦镜头和运动机构进行规定的操作，完成零件轮廓和网格的切割等工艺过程。

3）激光系统　在指令的控制下产生并输出稳定、可控的激光功率。并将激光光束引导到切割扫描运动机构上，进行可靠的切割。

4）检测系统　检测加工过程中的重要工艺参数。如：热压温度，走纸距离，激光功率，零件高度等。

5）机构本体　工艺过程的执行机构。为设备系统提供稳定、牢靠的结构框架，保证各系统能正常运行。为切割和堆积过程提供精确的定位基准，保证加工成形的精度。

系统结构图表示了叠层实体制造系统各子系统之间的关系和系统内信息流、物质流的流向，显示了系统的总体结构。可以看出，叠层实体制造系统包含软件、控制、伺服、激光、传感、结构及工艺等多种相关技术，是一个比较复杂的系统。

在系统结构的基础上，为了能有效地理解叠层实体制造工艺的功能需求，应用 Suh 的公理化设计原理，对叠层实体制造系统进行功能需求（FRs）的提取和对应设计参数（DPs）的设计。图 6.6-10 显示了叠层实体制造系统的递阶功能需求，图 6.6-11 则显示了对应的递阶设计参数。

根据叠层实体制造的工艺，成形系统应包含四项最基本的功能需求，即轮廓切割（FR_1）、支撑工件并垂直运动（FR_2）、加热加压（FR_3）和供料（FR_4）等。而每一项基本功能根据其具体实现又可分解出更详细的子功能需求。

例如：若利用激光来进行切割，满足轮廓切割需求时，则成形系统可分解出激光（FR_{11}）、光束焦点定位（FR_{12}）和排烟（FR_{13}）等子功能需求。其中激光子功能要求为轮廓切割提供可靠、稳定并且实时可控的激光功率；光束焦点定位功能要求将激光光束聚焦到一定高度，并在加工平面内精确定位（运动），进行轮廓切割；排烟功能则要求将激光切割轮廓时产生的烟雾及时地排放出去。而上面的子功能需求又可根据其具体的实现，分解出更加详细的功能需求。

利用这种功能分析方法，可以得到叠层实体制造工艺的 21 项具体功能需求，它们是：FR_{111} 激光源；FR_{112} 引导光束；FR_{113} 光束通断；FR_{114} 光束聚焦；FR_{121} X 向定位；FR_{1211} 与 Y 轴垂直；FR_{122} Y 向定位；FR_{123} 焦点平面与加工平面平行；FR_{13} 排烟；FR_{21} 工件垂直定位；FR_{211} 与加工平面垂直；FR_{22} 固定工件；FR_{23} 测量工件高度；FR_{31} 碾压；FR_{311} 碾压平面平行于加工平面；FR_{32} 加热；FR_{41} 收纸；FR_{411} 与放纸轴平行；FR_{42} 放纸；FR_{421} 走纸距离测量；FR_{43} 导引纸带。

这 21 项具体的功能需求勾画出了叠层实体制造系统的较详细技术内容，而成形机设计则根据这 21 项具体要求进行。一种可能的设计方案的设计参数如图 6.6-11 所示，对应于 21 项具体要求，有 21 项设计参数，它们是：① DP_{111} CO_2 激光器；② DP_{112} 反光镜；③ DP_{113} 快门；④ DP_{114} 聚焦镜；⑤ DP_{121} X 轴直线运动机构；⑥ DP_{1211} XY 联结块；⑦ DP_{122} Y 轴直线运动结构；⑧ DP_{123} Y 轴导轨安装；⑨ DP_{13} 跟随式排烟装置；⑩ DP_{21} Z 轴直线运动装置；⑪ DP_{211} 拉压螺栓调整；⑫ DP_{22} 工作台；⑬ DP_{23} 加工平面高度测量；⑭ DP_{31} 热压牵引定位；⑮ DP_{311} 牵引机构安装；⑯ DP_{32} 控温热源；⑰ DP_{41} 主动复卷机构；⑱ DP_{411} 放纸轴安装；⑲ DP_{42} 放纸机构；⑳ DP_{421} 同轴编码器；㉑ DP_{43} 导纸辊。



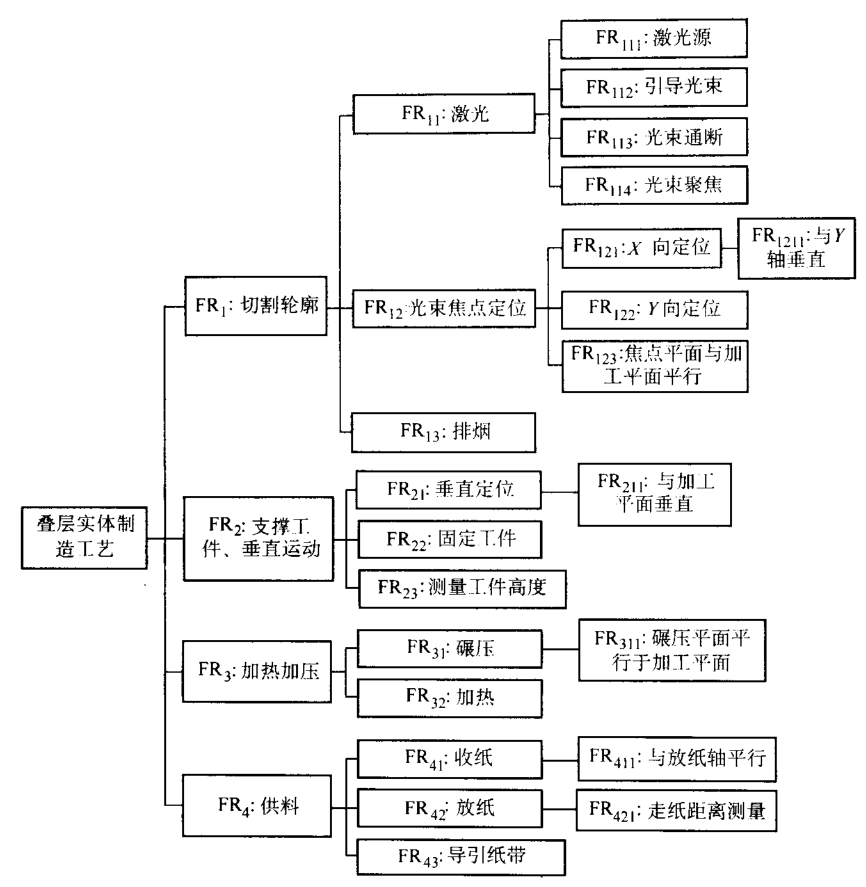


图 6.6-10　叠层实体制造工艺的功能需求递阶图

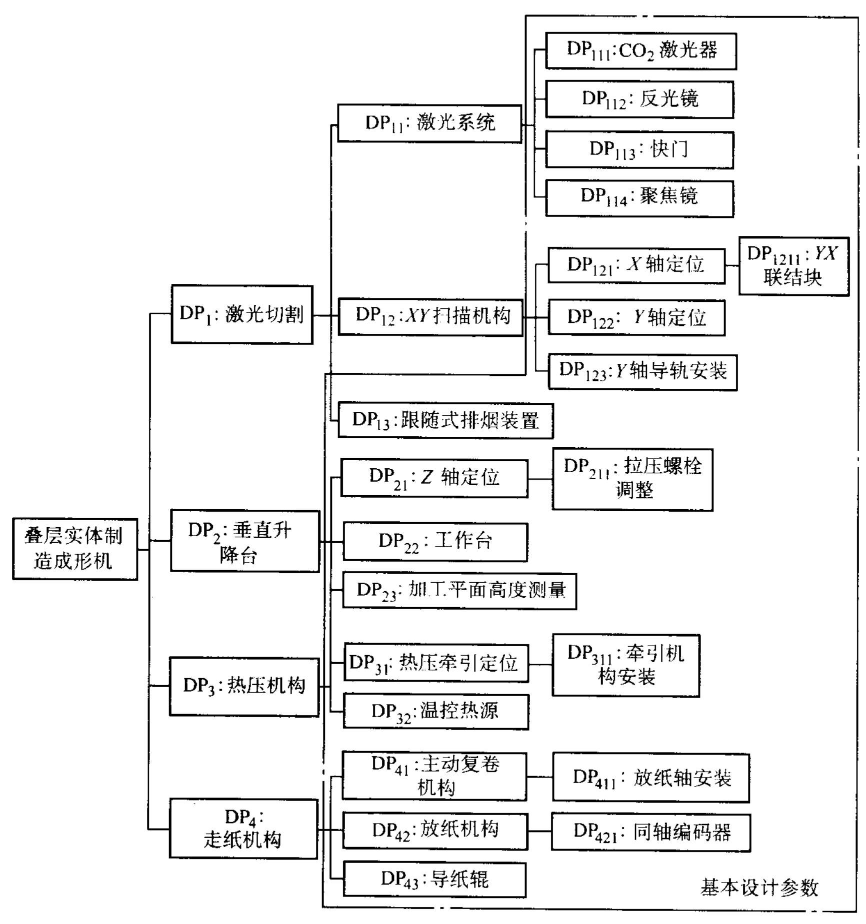


图 6.6-11　LOM 成形机的设计参数递阶图



根据机械电子学产品的设计思想，21 项设计参数可以分成两类，一类是需要在加工过程中实时确定、并有效控制的，即时域参数；另一类则是在系统制造时需要保证的，即结构参数。时域参数决定了叠层实体制造成形机的控制系统，而结构参数则决定了成形机本体结构。下面分别加以介绍。

2.2 叠层实体制造控制系统

在叠层实体制造的 21 个具体设计参数中有 8 个是时域参数：

1）DP_{111}　CO_2 激光器；
2）DP_{113}　快门；
3）DP_{121}　X 轴直线运动机构（简称：X 轴定位）；
4）DP_{122}　Y 轴直线运动机构（简称：Y 轴定位）；
5）DP_{21}　Z 轴直线运动机构（简称：Z 轴定位）；
6）DP_{31}　热压牵引定位（简称：热压定位）；
7）DP_{32}　温控热源；
8）DP_{41}　主动复卷机构。

所谓时域参数是指在产品的设计过程中，不能给出确定值，而只能给出取值范围的设计参数。如：温控热源（DP_{32}）是为满足加热（FR_{32}）层片间黏结剂的，其确切的加热温度在设计阶段无法准确设定，而且在叠层实体制造的加工过程中，其温度值是在实时变化的。在产品设计时只能确定加热的温度调整范围，比如：100～300℃。

时域参数对于机械电子学产品来说非常重要，因为它反映了机械电子学产品的可控性和对环境的适应性，它使产品在运行时可以根据环境的需要和功能的需要实时改变，实现最佳的工作状态。如：温控热源（DP_{32}）的温度值需要适应不同的黏结剂、不同的热压速度以及不同的热压距离对黏接质量的影响，它对于保证层叠的可靠性是至关重要的。因此，在机械电子学产品的设计中，要求对时域参数进行监测与控制。

这样，在叠层实体制造系统中，需要对 8 个时域参数进行实时控制，而控制系统应具有对这 8 个设计参数的控制输出和相应的检测信号输入。

另外，在功能需求中还有 2 个独立的检测参数：

1）FR_{23}　加工平面高度测量；
2）FR_{421}　走纸距离检测。

控制系统也需要输入它们的信号，以实现对设备运行状态的监控。这样可以得到叠层实体制造控制系统的需求图（见图 6.6-12）。

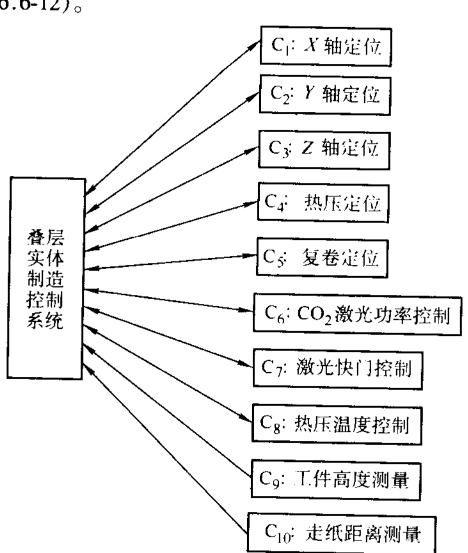


图 6.6-12　叠层实体制造控制系统需求图

图 6.6-12 给出了控制系统的控制需求。在 10 个控制对象中 C_1：X 轴定位和 C_2：Y 轴定位完成零件截面切割，扫描出各种复杂的轮廓图形，有较强的联动要求。它们之间是联动关系，需要至少有直线插补功能的数控系统控制；C_6：CO_2 激光功率控制则需要与激光切割，即 XY 的运动速度呈一定的比例关系，它与 XY 轴的运动也有联动关系；C_3：Z 轴定位，C_4：热压定位和 C_5：复卷定位之间以及与前面三个控制对象（C_1、C_2、C_6）之间没有明显的联动关系，它们在时序上是分开的，不同时运动；C_7：快门控制的状态只有两个（通、断），是开关量，用一位二进制数就可以控制，它与 XY 的扫描运动也有协调的关系，即在一定位置准确、快速的通断；C_8：热压温度控制是一个较独立控制量，与其他对象没有明显的协同要求；C_9：工件高度测量是输入信号。为简化机构，采用间接测量的办法。将差动变压器安装在热压装置上，测量加工平面的高度。为了求得加工零件的高度，则需要知道 Z 轴的定位位置，由 Z 轴下降的相对距离来测量工件高度；C_{10}：走纸距离测量也是输入信号。用光电旋转编码器安装在放纸轴上，测量放纸轴的转动角度，计算出纸带移动的具体距离。

由上述分析可知，C_1、C_2、C_3、C_4、C_5 都是运动定位对象，需要位移控制器来控制。如果将它们用一个 NC 系统来控制，那么该控制器应具有五轴的控制能力。而市场上具有两轴直线、圆弧插补和三轴线性插补的控制功能的 NC 控制卡多为四轴控制。解决的办法是用其中一个控制输出去控制两个时序上分开的运动轴，将运动控制信号在时间上分段，控制两个不同的运动。

表 6.6-3　叠层实体制造的工作循环

工　序	走纸	工作台上升	热压	激光切割	工作台下降
C_1：X 轴定位				——	
C_2：Y 轴定位				——	
C_3：Z 轴定位		——			——
C_4：热压定位			——		
C_5：复卷定位	——				
C_6：CO_2 激光功率控制				——	

表 6.6-3 显示了叠层实体制造一个工作循环的工艺流程。从中可以看出五个运动对象中 C_3、C_4 和 C_5 在时序上是分开的。其中 C_4、C_5 的定位精度对零件精度影响不大，且要求不高，分别为 1 mm 和 2 mm。而 Z 轴定位的精度要求较高（±0.03 mm），它直接影响到工件的成形精度。另外，Z 轴定位位置被用来测量工件的成形高度，不易与其他定位对象合用控制轴。因此可选择 C_4 和 C_5 合用 NC 控制卡的一个控制轴输出。

在叠层实体制造工艺中，为提高激光切割的质量，CO_2 激光功率应与 XY 扫描速度相匹配，特别是在加速和减速阶段。在切割轮廓时，运动速度高，启、停频繁，加减速时间短。因此匹配的实时性要求较高，需要一个控制器专门控制。这个控制器要根据 XY 扫描的实时运动速度，输出激光功率控制信号。XY 扫描运动速度是 X 轴和 Y 轴运动的合速度，不能直接测得。它的提取是实时控制激光功率的关键。若直接提取运动速度信号，只能得到 X 轴和 Y 轴单独的速度。而要得到二者的合速度，就必须经过勾股运算。需平方、开方，计算量较大，实时性差。在控制系统的设计中，应充分利用数控卡的三轴插补功能，用第三轴跟随的速度指示 XY 运动的合速度。这样就要将控制 C_4 和 C_5 的控制轴再



增加一个控制对象。用一个一比三的选通器对其进行选通。

图 6.6-13 显示了 SSM-500 的控制系统结构。其控制主机采用工业标准个人计算机系统（IPC），具有软件丰富，开放性好，易开发等特点。热压温度控制选用功能较齐全、与控制机有通信功能的温度控制单元：英国 West Instruments Ltd. 的 8100 型温度控制器。这种温控器具有温度显示，热电偶、热电阻及变送器输入，电压及直流输出功能，并可以 RS485 串行通信与主机通信。测量加工平面的差动变压器的输出是电压信号，需经模/数转换。测量放纸轴转角的光电编码器输出的是脉冲信号，用计数器对其进行计数。

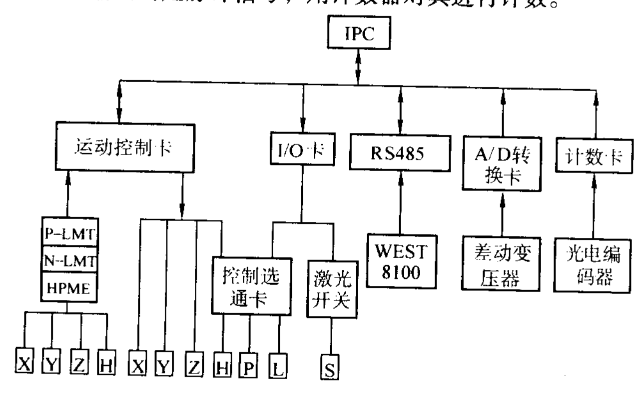


图 6.6-13 SSM-500 控制系统图

X—X 轴；P—复卷轴；Y—Y 轴；L—激光功率；
Z—Z 轴升降台；S—激光快门；H—热压轴

2.3 叠层实体制造结构设计要求

在叠层实体制造成形机的功能分析基础上，得到的 21 个具体的设计参数中，除 8 个时域参数外，其余 13 个都是结构参数。所谓结构参数是指在设计过程中，能给出确定值的设计参数，如 DP_{114} 聚焦镜。其焦距为固定的，在设计时就必须确定。结构参数作为产品系统功能实现的基础，在设计阶段体现在产品系统的本体结构中，而且在产品制造和运行状态下，应有较好的稳定性。

叠层实体制造成形机结构设计就是基于对 13 个结构参数分析基础上的。这 13 个结构参数是：① DP_{112} 反射镜；② DP_{114} 聚焦镜；③ DP_{1211} XY 联结块；④ DP_{123} Y 轴导轨安装；⑤ DP_{13} 排烟扇；⑥ DP_{211} Z 轴与加工平面垂直；⑦ DP_{22} 工作台；⑧ DP_{23} 加工平面高度测量；⑨ DP_{311} 牵引机构安装；⑩ DP_{411} 复卷轴与放纸轴平行；⑪ DP_{42} 放纸机构；⑫ DP_{421} 走纸距离检测；⑬ DP_{43} 导纸辊。

在这些结构参数中，有 5 个参数直接与叠层实体制造工艺相关，对工件的加工质量有直接影响，是本体结构中需要着重考虑的。这 5 个关键的结构参数是：

1) DP_{123}　Y 轴导轨安装。决定了切割时焦点的运动平面，称为扫描平面，记为 f_{focus}。

2) DP_{211}　Z 轴与加工平面垂直。决定了叠层实体制造的堆积方向，记 Z 轴导轨的运动方向为 A_Z。

3) DP_{22}　工作台。决定了加工初期成形材料受压和切割的平面，称为工作台平面，记为 f_{work}。

4) DP_{311}　牵引机构安装。牵引机构牵引热压装置运动，使热压辊的底面扫出一个平面，即热压平面，记为 f_{heat}。

5) DP_{43}　导纸辊。决定了纸带在加工区域的展开平面，形成走纸平面，记为 f_{paper}。

为了分析方便，记加工平面为 $f_{process}$。它是一个抽象的平面，在它上面发生主要的工艺过程，相当于离散过程的离散面。这些平面的关系如图 6.6-14 所示。

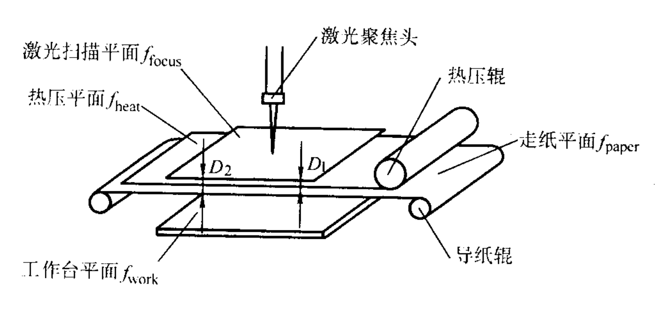


图 6.6-14 各种工艺平面的关系

在叠层实体制造工艺中，在加工平面 $f_{process}$ 上要完成材料粘接和零件轮廓的切割。粘接材料由热压装置完成，因此热压平面 f_{heat} 决定了材料的加工平面 $f_{process}$；零件轮廓切割由 XY 定位机构带动激光聚焦镜完成，激光焦点的扫描平面 f_{focus} 决定了零件的截面平面。因为每次层叠都发生在是工件最上面的新层，因此加工平面 $f_{process}$ 就是工件的顶平面。而激光焦点要在新层上切割截面轮廓。如果二者不重合，一方面将造成切割光斑聚焦不准，影响切割质量，另一方面会使实际粘接的截面发生变化，不再是分层时得到的零件截面，造成零件的形状误差（如图 6.6-15 所示）。因此，理想状态下，热压平面 f_{heat} 和扫描平面 f_{focus} 应重合，而它们重合的平面就是加工平面 $f_{process}$。

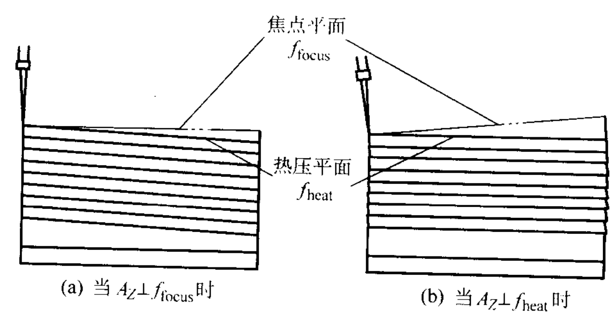


图 6.6-15 扫描平面 f_{focus} 与热压平面 f_{heat} 不重合造成零件形状的误差

但考虑到激光焦点有一定的景深。其扫描平面 f_{focus} 不是平面，而是有一定厚度的薄片。而且热压工艺要求热压时需一定的预压量，以产生热压力。热压辊的底面比工件顶平面低，热压平面与扫描平面不在同一高度上，相差一个距离 D_1（见图 6.6-14），D_1 称为预压量。所以保证扫描平面 f_{focus} 与热压平面 f_{heat} 的平行是结构设计的重要要求。

纸带展开平面，即走纸平面 f_{paper} 与加工平面 $f_{process}$ 没有直接关系。但在每一次加工循环中，要在该平面上输送新层，以待下一次加工循环。由于纸张有一定的柔性，走纸平面 f_{paper} 与加工平面 $f_{process}$ 的平行要求不是非常高。当成形材料较硬时，如陶瓷薄片，则走纸平面 f_{paper} 与加工平面 $f_{process}$ 的平行要求需适当提高。

走纸平面 f_{paper} 与加工平面 $f_{process}$ 间有一个距离 D_2（见图 6.6-14）。这个距离用来使纸带产生张紧力，保证热压过程的稳定可靠。在叠层实体制造工艺中，当工作台下降，新的纸料移到工件上方后，工作台带动工件上升，工件顶面将顶起纸带一段距离 D_2，产生一定的张紧力。

根据上述分析，激光焦点的扫描平面 f_{focus}、热压平面 f_{heat}、纸带平面 f_{paper} 及工作台面 f_{work} 应满足相互平行的要求，即：$f_{focus} /\!/ f_{heat} /\!/ f_{paper} /\!/ f_{work} /\!/ f_{process}$，特别是 $f_{focus} /\!/ f_{heat}$ 直接关系到叠层实体制造的加工精度。

由于叠层实体制造是沿一定方向的，层叠的方向应和零件轮廓离散的方向一致。在离散时，零件形体和坐标系相对固定，离散面沿分层方向逐层递进。而在叠层实体制造工艺



中，由激光扫描平面 f_{focus} 和热压平面 f_{heat} 决定的堆积面是固定的，零件形体和坐标系则相对移动，其移动的方向是离散分解方向（即分层方向）的反方向。

零件的分层方向在实际层叠过程中是由升降台、Z 轴定位机构来实现的。Z 轴的运动方向 A_Z 就是堆积的反方向，并与分层面，也就是加工平面 $f_{process}$ 垂直：$A_z \perp f_{process}$（见图6.6-16）。如果设备结构不能保证垂直要求，加工出的零件就会产生错移（见图6.6-17），零件的精度就无法保证。因此，升降台、Z 轴与加工平面的垂直 $A_Z \perp f_{process}$，同样是结构设计需充分考虑的重要问题。

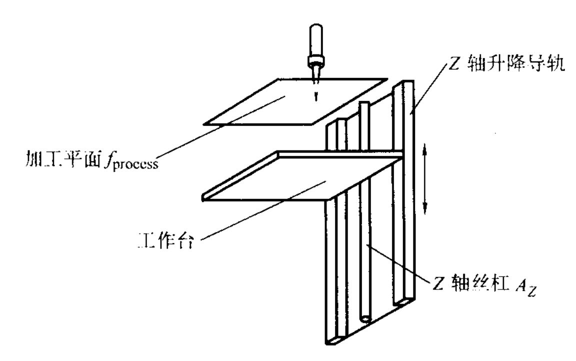


图 6.6-16　Z 轴与加工平面的关系

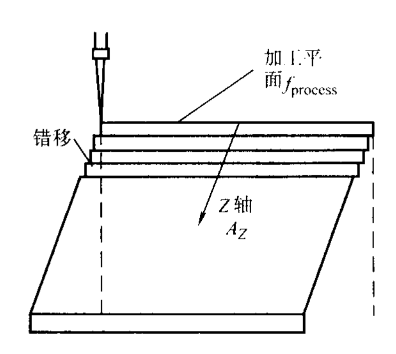


图 6.6-17　Z 轴 A_Z 与加工平面 $f_{process}$ 不垂直造成的错移

综合上述，在叠层实体制造成形机的结构设计中，四个平面：激光扫描平面 f_{focus}、热压平面、走纸平面 f_{paper} 和工作台面 f_{work} 之间应保证平行，其中扫描平面与热压平面的平行，以及与升降台 Z 轴 A_Z 的垂直要求是影响零件加工精度，实现精确成形零件的重要结构设计要求。

2.4　本体结构设计

叠层实体制造成形机的本体结构包括机架以及各运动执行机构的安装，其设计的依据是2.3节分析的结构参数得到的设计要求。

为了保证四个平面的平行，特别是焦点扫描平面 f_{focus} 和热压平面 f_{heat} 之间的平行关系，较早的设计采用了双层平台的结构，将 XY 扫描定位机构和热压机构分别安装在两个不同高度的平台上（图6.6-18）。这种设计避免 XY 定位机构和热压装置的运动干涉，同时使设备总体尺寸不致过大。目前大多数叠层实体制造成形机都采用双层平台结构。如：LOM1015，LOM2030，SSM－1600 和 ZIPPY I 等。

双层平台中的上层平台称扫描平台，在上面安装 XY 扫描定位机构以及 CO_2 激光器和光束反射镜等。可使从激光光源到最后聚焦镜的整个光学系统都在一个平台上，提高了光路的稳定性和抗震性。下层平台称基准平台，在上面安装热压机构和导纸辊，同时它还连接扫描平台和升降台 Z 轴导轨。是整个设备的平面基准。它上面有较大的平面面积，可

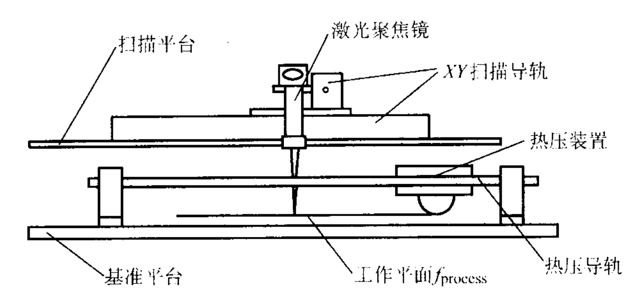


图 6.6-18　双层平台结构

以作为装配时的测量基准，见图6.6-19。通过保证各安装面的平行度，可以达到激光扫描平面 f_{focus}、热压平面、走纸平面 f_{paper} 和工作台面 f_{work} 之间的平行要求，方便了安装调试。基准平台要求有较好的结构稳定性和抗振性。

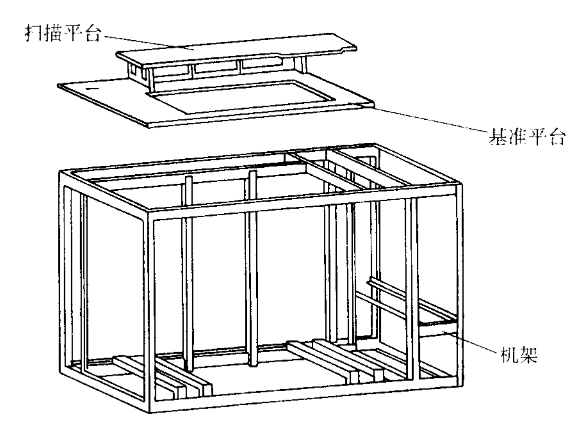


图 6.6-19　双层平台和机架结构

基准平台固定机架上，成形机的机架可采用矩形钢管焊接或铸铁结构。矩形钢管具有抗弯、抗扭能力强，重量轻，易于安装等优点，用它焊接制造的机架，变形小，轻巧，刚性好。而铸铁机架则具有结构稳定、抗震性能好的优点，另外，铸铁机架有较大的加工、安装平面，因此本体的结构精度较高，但重量较重。

升降工作台 Z 轴的安装可采用如图6.6-20所示的方式。Z 轴的导轨、丝杠安装在垂直底板上，组成一个较独立的结构单元，称为 Z 轴导轨座。垂直底板的上端面和侧面是有垂直度要求的安装基准。上端面与基准平台的下平面定位，保证导轨在 YZ 平面内的垂直度。在机架的后部，靠近垂直底板处上下各有一根中间横梁，横梁之间有两根立柱。立柱承受一部分基准平台和 Z 轴导轨座的重量，同时从后面支撑垂直底板，保证导轨在 XZ 平面内的垂直度。

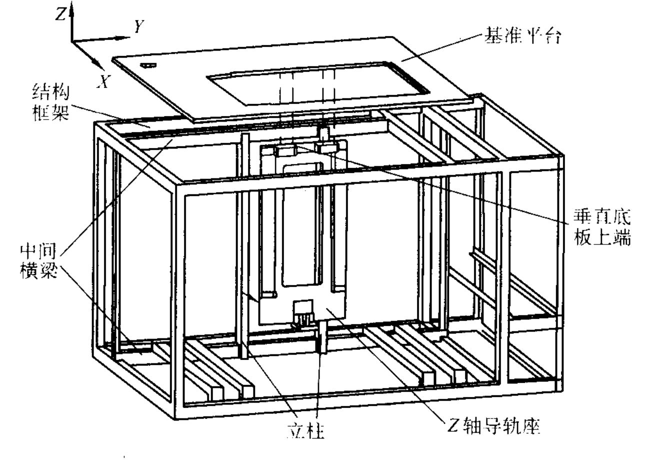


图 6.6-20　Z 轴导轨的安装



立柱对垂直底板的支撑是靠立柱中间的三个螺栓（图 6.6-21）。三个螺栓中，中间的螺栓将垂直底板拉紧，而两边的螺栓则顶住垂直底板。这样，三个螺栓就可以从 ± *X* 两个方向对垂直底板的下端进行拉压调节，以保证 *Z* 轴导轨在 *XZ* 平面内的垂直度。其优点是垂直底板的厚度减小，重量降低。而且，只有一个方向的调节，调整方便，容易达到垂直度的要求。

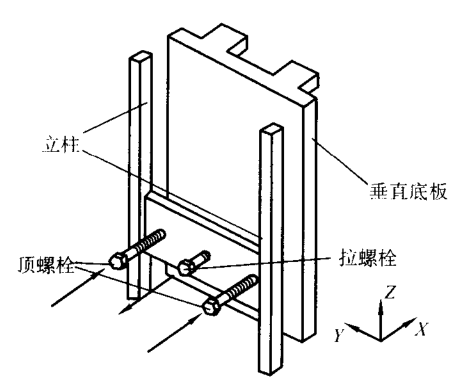


图 6.6-21　立柱对垂直底板的支撑

双层平台和矩形钢管焊接机构的本体结构在大多数叠层实体制造成形机的结构中采用，这种结构具有重量轻，零部件加工制造容易，安装、调整简单的特点。

随着对叠层实体制造工艺理解的深入，近年来出现了将热压和 *XY* 扫描机构集成在一起的单层平台结构。这种结构使得成形机结构大大简化，并节省了一个驱动轴，降低了设备成本。

在双层平面结构中，*XY* 激光扫描和热压牵引是由两套独立的机构完成的。由于这两套机构的运行平面重叠，为了避免机构干涉，因此必须采用两层平面，将两套运动机构在垂直方向上分开。

但在叠层实体制造工艺中，*XY* 扫描与热压运动从不同时进行，而且热压运动的方向都是平行于某一个扫描轴（如 *Y* 轴）的。因此可以将热压牵引机构与 *XY* 扫描机构合并，成为一个既可以进行平面切割运动又可以完成热压运动的“一体化”装置，达到简化成形机机构，降低成本目的。

热压－扫描集成机构如图 6.6-22 所示。它由热压装置，*X* 轴运动机构（包括驱动电机、导轨、丝杠或同步齿形带，钢丝等），*Y* 轴运动机构（包括驱动电机、导轨、丝杠或同步齿形带、钢丝等），聚焦镜和挂接机构组成。其中热压装置和 *X* 轴运动机构都通过滑块在 *Y* 轴导轨上运动。而 *Y* 轴的驱动部件（如丝杠、滑块等）只与 *X* 轴运动机构连接。挂接机构利用机械挂接或电磁铁吸附完成 *X* 轴运动机构与热压装置的联接、分离。

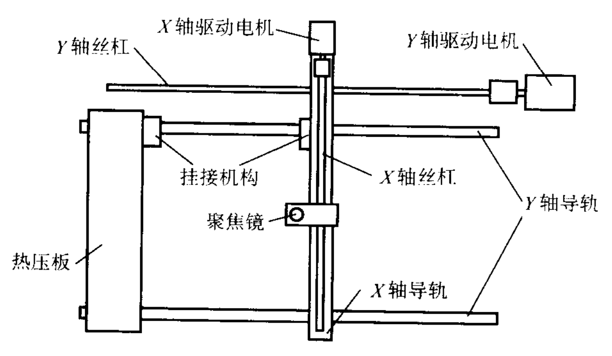


图 6.6-22　热压－扫描集成机构示意图

热压－扫描集成机构有两种工作状态。一种是扫描状态，当进行零件轮廓、边框和网格切割时，*XY* 轴运动机构共同组成一个二维扫描运动机构，完成二维图形的切割。当切割完后，需要进行热压运动，粘接新层时，*X* 轴运动机构沿 *Y* 轴移动到热压装置近处（见图 6.6-23a），通过挂接机构，挂接上热压装置。此时为热压状态。在 *Y* 轴驱动的带动下，*X* 轴运动机构和热压装置一起运动，完成碾压运动，实现新层的粘接（见图 6.6-23b）。当热压完后，*X* 轴运动机构和热压装置又一起回到原始位置，挂接机构分离，回到扫描状态。*X* 轴运动机构又可独立运动，热压装置则停留在原位，等待下一个工作循环，再次热压。

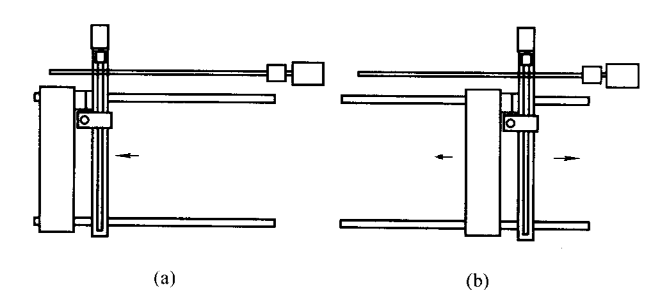


图 6.6-23　热压－扫描集成机构的状态切换

热压－扫描集成机构完全不影响原有的叠层实体制造工艺过程，而成形机省却了原来用来牵引热压装置的一套运动机构（包括导轨、同步带、驱动电机、驱动控制电器等）降低了成本。而成形机的本体机构也不存在机构干涉的问题了，不需要采用两层平台，只要求一层平台就可以了，本体结构得到大大简化。热压－扫描集成的一体化结构形式在 SSM－800 叠层实体制造成形机被采用。

3　成形材料及其性能要求

成形材料在叠层实体制造工艺技术中起着非常重要的作用，直接影响着原型零件的成形质量和加工过程的正常进行，同时也对各工艺参数的选取起决定性作用。在叠层实体制造工艺中成形材料是指涂覆有热熔胶树脂的涂覆纸，它是在普通纸张（称为基纸）上应用热涂工艺涂覆上一薄层热熔胶制成的。其性能由基纸、热熔胶和涂覆工艺决定。本节主要介绍基纸和热熔胶的性能及其对叠层实体制造工艺的影响。

3.1　基纸的性能要求

叠层实体制造工艺所用涂覆纸的基纸材料一般为牛皮纸或相当的长纤维纸。对基纸的主要指标有紧度、平滑度、抗张强度、表面强度、湿变形、永久变形、耐破度、撕裂度、伸长率和透气度等。

纸张的生产过程包括了施胶、压榨、干燥和表面加工等工序。施胶过程是将组成纸张的植物纤维彼此粘接起来，使纸页变得比较强韧。在对纸张进行表面施胶后，赋予纸张以抗墨水性和抗水性。同时纸页获得了耐磨的坚实牢固的表面。压榨过程则是将纸张在压榨辊之间经过，以提高纸张的平滑度、干度和抗张强度，纸张厚度有所减薄，不透明度有所降低。

干燥过程是以一定张力将纸张紧贴在热烘缸上，熨平纸张表面，并促使纤维互相间的进一步靠近而使纤维相互结合，从而决定纸的主要性质（机械强度、透气度、吸收能力等）。此外，干燥过程还能赋予纸张以由干燥规程所决定的专门的性质。在进行接触干燥时，除了蒸发水分之外，纸张的表面还被熨平，并获得一定的平滑度。

干燥过程的加热温度对纸张伸长率的影响如图 6.6-24 所示。随着干燥温度的升高，伸长率指标下降。这对于叠层实体制造工艺减小翘曲变形是有利的。但另一方面，纸张的

吸收能力和透气度随干燥温度的升高而提高。而且如果干燥时间加长，纸张的收缩也会增大。

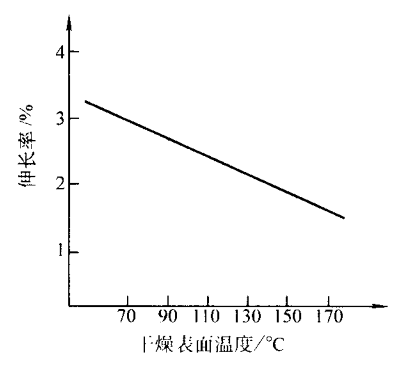


图 6.6-24 干燥温度对伸长率的影响

纸张还可以通过表面加工被赋予不同的性质。如：表面施胶，可在表面形成薄膜，可防止水渗透到纸中。叠层实体制造工艺用的涂覆纸就是利用热涂工艺在纸张表面涂覆上热熔胶而成的。热熔胶涂覆纸具有下列结构特点。

1）具有多相复杂的结构要素成分。在纸的成分中有长短不一的不同来源的纤维（主要是植物纤维，合成纤维和矿物纤维较少），以及填料、胶料和染料。

2）结构要素在三个互相垂直方向上分布是各向异性的。

3）结构的多毛细孔胶体特性决定了纸的吸收性能、透气度、吸湿性等。

4）纸幅的两面性质不同。

纸张在受力情况下会发生拉伸变形，但纸张不是理想的弹性体，也不是理想的黏性体。纸张既有弹性又有黏塑性，即所谓的流变性质。纸张的弹性变形性质表现在当施加引起变形的作用力之后，纸张中的纤维试图伸直，纤维结构中的分子及单根纤维之间的距离发生变化。当作用力和变形增大后，纸张中纤维大分子的构形和纤维表面上互相联接的分子之间的距离均会发生变化，纸张纤维构形也整个地发生改变，即缓弹性或弹塑性变形状态，也称为弹性后效变形。继续增大作用力和变形，就进入塑性变形状态，此时纤维发生不可逆的位移，并伴随有相接触的纤维表面间分子结合的破坏。

在叠层实体制造工艺中所关心的是在原型零件（工件）出现翘曲或开裂之前纸张的变形。此时成形纸的变形量很小，应属于弹性变形范围。另外，成形纸在叠层过程中的受力和变形，与层间的热熔胶黏结剂的应变特性有密切关系。关于热熔胶树脂的应变特征将在后面介绍。

通过对纸张性能及生产过程的了解，根据对于叠层实体制造工艺的要求，可提出成形纸的性能和生产要求：

1）通过表面施胶来防止热熔胶在热压过程中过度渗透进成形纸内部，从而导致成形纸黏接不牢；

2）提高纸张的表面致密度，需要经压榨工序；

3）需要经干燥工序来提高成形纸的干度，降低成形纸在热压过程中的收缩率；

4）要尽量降低纸张收缩率和弹性变形量，使成形纸在叠层实体制造工艺中减小变形，避免产生翘曲或开裂现象。

3.2 熔融胶黏结剂及其热压变形

热熔胶黏结剂是由具有热塑性的高分子材料制成，在加热熔融之后可出现流动性，这种高分子熔融体可以作为胶黏剂来使用。高分子熔融体在浸润被黏表面后通过冷却发生固化，起到胶黏作用。

在配制热熔胶时必须掌握好胶黏剂的强度和熔融体黏度之间的关系。一方面高分子物质应有足够高的相对分子量才能具有一定的强度和韧性，而另一方面熔融体的黏度也会随着分子量的增高而迅速增大，黏度增大后，熔融体的浸润作用会降低。提高温度可以降低熔融体的黏度，但是温度过高又容易引起高分子的热降解。因此为了提高热熔胶的流动性和表面的黏附性，必须加入各种辅助成分。一种热熔胶可能包含有下列各种成分：基本树脂、增黏剂、增塑剂和填料等。

由于热熔胶只需将熔融体冷却就可以固化，所以具有一系列优点：黏结速度快、便于机械化作业、无溶剂、安全、经济。因此它得到广泛的应用。但是，热熔胶也有耐热性较差，黏结时需要加热到较高的温度，对气候比较敏感等缺点。

热熔胶在黏结时，在热熔胶内会产生一定的内应力，这是影响黏结强度和耐久性的重要因素之一。内应力的产生有二个来源：

（1）黏结剂固化过程中体积收缩产生的收缩应力；

（2）黏结剂和被黏物的线胀系数不同，在温度变化时产生热应力。

热熔胶的弹性模量、黏结力、黏性、熔化固化温度等性能指标对叠层实体制造的热压工艺是极重要的因素。因为在热熔胶涂覆纸的一般应用中，纸张都是单张或少数层叠的应用，热熔胶的内应力不容易积累，表现不突出。但在叠层实体制造工艺中，热熔胶涂覆纸将被成百上千地层叠在一起，内应力也会成百上千地累积起来。热熔胶内应力的作用很快就会显现出来，最终造成零件翘曲或开裂。因此对于叠层实体制造工艺应要求热熔胶的弹性模量低、延伸率高、在熔融体凝固相变过程中体积变化小、在热胀冷缩过程中膨胀系数小。另外，考虑到工艺的可靠性和稳定性，要求热熔胶的黏结性能好，黏结牢固，且黏结温度适当。黏结温度过高容易造成工件较大温差，增大了热应力；但黏结温度过低也会造成原型形状稳定性变差。黏结温度一般选在70～100℃

热熔胶的涂覆厚度对叠层实体制造工艺也有较大影响。如果热熔胶涂覆层较厚，热压时热熔胶熔化后的流动性过大，易造成工件的错层；但是，如果热熔胶涂覆层过薄，热压时热熔胶的流动性不够，又会造成黏性不够，叠层黏结不牢。因此，成形纸上的热熔胶厚薄要合适才能够达到最佳的成形效果。

热熔胶的温度－应变曲线可如图6.6-25所示。在较低的温度范围内，材料的形变很小，表现出较高的模量。把这种力学状态称为玻璃态。进一步升高温度，形变明显增加，材料的力学状态发生转变，并在随后的一段温度区间内达到相对稳定的形变。此时材料变得柔软而富有弹性，在外力作用下可发生较大的形变，外力除去后形变又容易回复。这种力学状态称为高弹态。温度再进一步升高，材料的形变又再次增大，最后完全转变成黏流态。

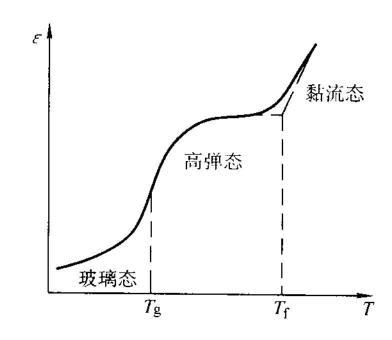


图 6.6-25 聚合物温度－应变曲线

可见非晶态聚合物材料因温度的不同而具有不同的力学行为，随温度的增加依次出现玻璃态、高弹态和黏流态等三



种力学状态，相应地出现两次转变。把玻璃态与高弹态之间的转变称为玻璃化转变，对应的转变温度称为玻璃化温度，以 T_g 表示；把高弹态到黏流态的转变称为黏流转变，对应的温度称为黏流温度，以 T_f 表示。

热熔胶在热压过程中，可能经历玻璃态、高弹态和黏流态的转变过程，它的变形可以用黏弹力学中的四元件模型描述（图 6.6-26）。

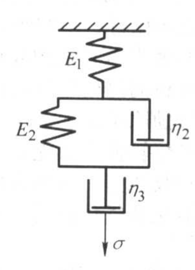


图 6.6-26　黏弹力学中的四元件模型

四元件模型是根据高分子的运动机理设计的，第一部分为虎克弹簧 E_1，相当于分子的键长键角的变化引起的普弹形变；第二部分为 E_2 和 η_2 的并联模型，相当于高分子链段运动引起的高弹形变；第三部分是一个黏性元件 η_3，对应于高分子的黏流运动引起的永久形变。

在热熔胶状态改变过程中，四元件模型中的单元不是孤立地起作用，只是单元的松弛时间随温度变化，在通常的时间概念里觉察不到。在低温情况下，黏性元件的黏度 η_2 和 η_3 较高，因此，热熔胶只能表现出用弹簧弹性模量 E_1 确定的快速弹性响应。在较高的温度下，黏性元件黏度 η_2 的作用就变得明显，从而第二个弹簧弹性模量 E_2 的作用也变得明显，E_2 和 η_2 的并联模型导致的变形可以恢复，此时黏性元件黏度 η_3 比较大；在更高的温度下，黏度 η_2 很低，应力能很快地传递到黏度为 η_3 的第二个黏性元件。当这种响应占支配地位时，由于没有回复力，故产生不可逆变形，几乎没有弹性。实际上这些单元都在起作用，只是其中的一种或另一种起着主导作用而已。

四元件模型可以作为热压过程中热熔胶应变的模型。经分析发现，热压工艺的热压温度、热压压力和热压速度等工艺参数是通过对热熔胶的压应力、黏度和剪切模量的作用来影响热熔胶形变的。其作用关系如图 6.6-27 所示。

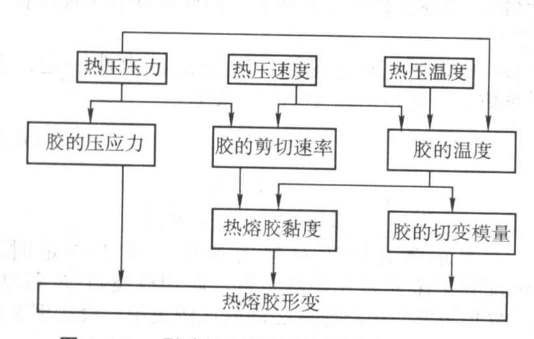


图 6.6-27　影响热熔胶形变因素的层次关系图

其中，热熔胶形变与黏度、切变模量、压应力的关系可通过黏弹性力学模型建立；热熔胶黏度与温度、胶剪切速率的关系以及热熔胶剪切模量与温度的关系可以通过实验测定；热熔胶温度与热压压力、速度、温度等热压参数的关系以及热熔胶剪切速率与热压压力、速度的关系，可通过传热学、力学计算建立。

考虑热压过程，由于热压辊或热压板的作用，热熔胶受到正压力，同时温度急剧升高，经过玻璃态、高弹态直至黏流态，并产生塑性变形。整个过程可以统一用四元件模型描述。但一般热压过程时间很短，当热压辊或热压板离开后，热熔胶的压应力立即降为零，同时热熔胶温度迅速下降。这时，弹簧 E_1 产生的弹性形变马上得到恢复，弹簧 E_2 和黏性元件 η_2 组成的并联黏弹变形在弹簧 E_2 的回复力作用下，也很快得以完全恢复；只有黏性元件 η_3，由于没有回复力，产生的变形不能恢复，成形塑性变形。

因此四元件模型中的黏性元件 η_3 的塑性变形是最终的热熔胶形变。其应变 ε 满足以下方程：

$$\sigma = \eta_3 \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} \tag{6.6-1}$$

式中，σ 为热压板或辊施于热熔胶上的压应力；$\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t}$ 表示 ε 的变化速率。

假设热压辊或热压板与工件的接触为平面接触，压应力均匀分布，即

$$\sigma = \frac{P}{2hB} \tag{6.6-2}$$

式中，P 为热压辊/板对工件的总压力；$2h$ 为接触面长度；B 为工件宽度。

图 6.6-28 显示了某热熔胶在不同剪切速率下黏温曲线的测试结果。可以看到，剪切速率对热熔胶黏度的变形有较大的影响。

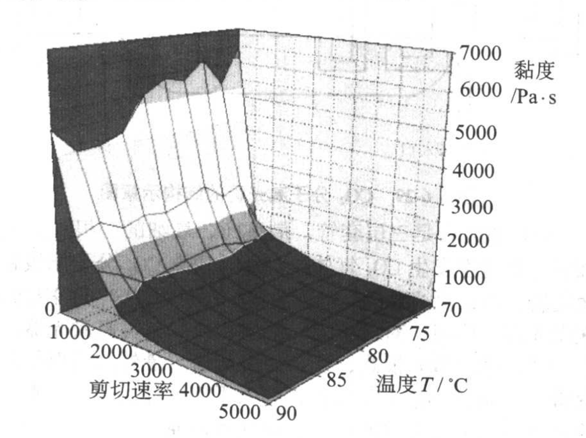


图 6.6-28　热熔胶在一定剪切速率下的黏温曲线

但在叠层实体制造工艺的热压过程中，热熔胶层很薄，层间的错移十分微小，造成的热熔胶剪切变形和剪切速率也十分微小，因此可以忽略剪切速率对热熔胶黏度变化影响。

根据实验结果，近似地将黏度 η_3 随温度的变化设为线性关系。其方程为

$$\eta_3 = K_\eta (T - T^*) + \eta_3^* \tag{6.6-3}$$

$$K_\eta = \frac{\eta^* - \eta_1}{T^* - T_1} \tag{6.6-4}$$

式中，T 为当前温度，η_3^* 为热熔胶在温度 T^* 时的黏度；K_η 为黏度随温度直线变化的斜率。

在叠层实体制造工艺中热熔胶层很薄，其温度可以认为是上下相邻两叠层的平均值，因此热熔胶的温度及其变化可利用温度场模拟计算得到，进而计算出热熔胶的剪切应力。

4　叠层实体制造工艺的关键技术

上节介绍了叠层实体制造工艺及其成形设备的控制与本体结构。从叠层实体制造的工艺过程可以看到，该工艺是利用激光切割薄片材料得到零件的截面、利用热压工艺实现层与层的堆叠。而在层片堆叠的过程中由于热的影响，工件十分容易翘曲变形，特别是在制造大型零件时。因此，激光切割、热压工艺和防止翘曲变形是实现叠层实体制造的关键技术。



4.1 激光切割工艺

4.1.1 CO_2 激光器及激光加工效应

由于 CO_2 激光器的功率较高、价格较低等特点，在以热效应为主的材料加工场合应用十分普遍。在快速原型技术中，CO_2 激光器大量应用于层片的切割和烧结工艺中，功率一般在 10～200 W。更高功率的 CO_2 激光器则应用在金属直接堆积成形的快速制造技术中。

对于 10～200 W 功率的 CO_2 激光器多采用封离式电激励结构，即在激光器内，工作气体不发生流动，封闭在放电管内。优点是结构比较简单、紧凑、使用方便。它的每米放电长度产生的激光功率约为 50～60 W，快速成形技术中的叠层实体制造和选区激光烧结常采用这种激光器，对于非金属箔材（纸、塑料、粉末、层厚小于 1 mm），一般选用 1 m 左右的激光管。图 6.6-29 为封离式电激励 CO_2 分子激光管的结构示意图。

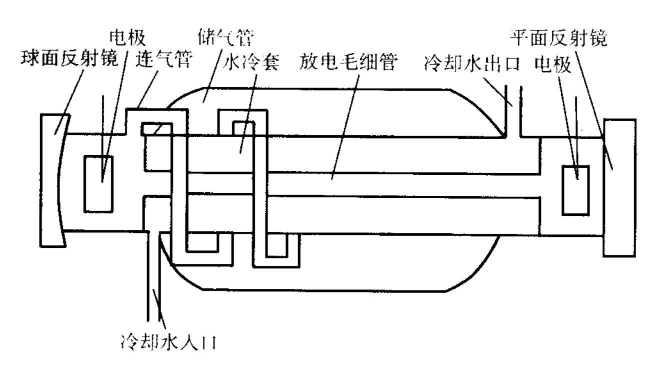


图 6.6-29 CO_2 分子激光管的结构示意图

CO_2 激光管是三层套管，最里面、最细的一根是放电毛细管。在这里发生 CO_2 气体放电，并建立 CO_2 分子能级粒子数反转，形成激光振荡。中间的那根是冷却管，通冷却水。在激光器工作时，对放电毛细管进行冷却，提高激光器的输出功率，稳定激光模式，延长使用寿命。最外的一根是贮气套管，它储存 CO_2 工作气体，增大工作气体的体积，贮气套管与放电毛细管之间通过一根回气管连通。

CO_2 激光器的激励方式以直流激励为主，激光电源在激光管的两端电极间生产上万伏特的高压，将放电毛细管中的 CO_2 气体电离并发生激光振荡，产生激光输出。由于是受激辐射，激光光波具有相同的频率、方向、偏振态和严格的相位关系，除一般的光特性外（如：光的反射、折射等），还具有强度（亮度）高、单色性好、相干性好和方向性好的特点。另外，激光可实现在空间和时间上的高度集中，一束光经过聚焦后在焦点附近能产生几千度甚至几万度的高温。这一效应可用来切割和熔化材料，实现对材料的快速、精确的加工。在叠层实体制造工艺就是应用了 CO_2 激光的切割作用。

激光对材料进行热加工时，其过程可分为：激光束照射材料、材料吸收光能、光能转变成热能、材料汽化和熔融溅出、使材料去除或破坏等几个阶段。

激光束照射到材料表面时，一部分光能从材料表面反射掉，一部分透射入材料内，被材料吸收。透入材料内部的光能对材料起加热作用，不同材料对于不同波长激光的吸收与反射有着很大区别。当材料表面与空气分界，且光波为垂直入射时，材料表面的反射率 R 可由下式估算：

$$R = (1-n)^2 + k^2/(1-n)^2 + k^2 \qquad (6.6\text{-}5)$$

式中，n 和 k 是复数反射率的实部和虚部，对于非金属材料 $k=0$。

材料的加热是光能转换为热能的过程。设入射激光束的光功率密度为 Q_i，材料表面吸收的光功率密度为 Q_o，则有

$$Q_o = Q_i(1-R) \qquad (6.6\text{-}6)$$

被材料吸收的光功率密度深入材料内部，其规律可由Beer－Lambert定律确定：

$$Q(z) = Q_0 e^{-az} \qquad (6.6\text{-}7)$$

式中，$Q(z)$ 是光束轴线方向距材料表面深 Z 处的激光功率密度分布函数；a 是光在材料中的吸收系数。

材料对激光光能的吸收与光束的波长有关。当激光波长较长时，光能直接被材料的晶格吸收而使热振荡加剧；当激光波长较短时，光能激励原子层上的电子，这种激励通过碰撞传播到晶格上，使光能转换为热能。

激光照射使材料吸收能量，当吸收的能量足够高时，被照射的材料表面达到溶化和气化温度，从而使材料气化蒸发或熔融溅出。

在叠层实体制造工艺中，利用 CO_2 激光对薄片材料进行切割，其主要反应特征就是材料的气化蒸发。

综合上述吸收、升温、汽化三个阶段，根据能量守恒，可得到激光加工过程的数学方程：

$$\eta P(1-R) = vBt\rho(c\Delta T + L_m + fL_v) \qquad (6.6\text{-}8)$$

式中，P 为入射激光功率；R 为反射系数；η 为过程总效率；v 为切割速度；B 为切缝宽度；t 为切割厚度；ρ 为材料密度；c 为材料比热容；f 为气化部分所占比例；ΔT 为材料升温到熔化温度的温差；L_m 为材料熔化潜热，；L_v 为材料气化潜热。

从方程式（6.6-8）中可以看出激光功率与切割速度、切逢宽度、材料切割厚度成正比。在其他条件不变的情况下，当扫描速度提高时，为保证激光切逢宽度和切割厚度不变，激光功率应成比例地增加。

4.1.2 叠层实体制造中的激光切割控制

对于叠层实体制造工艺，切割宽度 B 直接关系到尺寸精度和表面质量。另外，切割厚度（深度）t 同样十分重要，如果在切割零件截面轮廓时切深不够，零件截面与多余部分不能完全分离，加工完成后就不能得到完整的零件。特别是在切割工件外框时，如果切深不够，纸带不能与新层分离，走纸机构运动时就可能拉断纸带，出现故障，中断造型过程。另一方面，若切深过深，在切割新层时就会切割到下面已经成形的层上，轻者在零件表面留下疤痕，重者破坏零件的形状，使零件精度大大降低。因此切深必须控制在一层纸的厚度上。

对式（6.6-8）进行变换，假设材料物性一定，表面（反射系数）一定，则式（6.6-8）变为

$$Bt = \frac{P}{v}A \qquad (6.6\text{-}9)$$

$$A = \frac{\eta(1-R)}{\rho(c\Delta T + L_m + fL_v)}$$

式中，A 表示激光加工对象的物性。当 A 一定时，式(6.6-9)说明要保证激光切割质量，即切缝宽度 B 和厚度 t 稳定，激光功率和切割速度必须成比例关系。设比例系数为 D，即 $P = D \cdot v$，则

$$D = \frac{Bt}{A} = \frac{Bt\rho(c\Delta T + L_m + fL_v)}{\eta(1-R)} \qquad (6.6\text{-}10)$$

假设聚焦镜出口功率 $P = 15$ W，切割速度 $v = 150$ mm/s，纸的厚度 $t = 0.11$ mm，切割宽度 $B = 0.15$ mm。由式（6.6-9）、式（6.6-10）可得

$$dB = \frac{A}{t}dD = \frac{0.165}{0.11}dD = 1.5dD \qquad (6.6\text{-}11)$$

$$dt = \frac{A}{B}dD = \frac{0.165}{0.15}dD = 1.1dD \qquad (6.6\text{-}12)$$



式（6.6-11）和式（6.6-12）说明切割宽度 B 与切割厚度 t 的变化率是 D 变化率的1.1～1.5倍。激光功率与速度的比例关系稍有变化，就会引起切缝宽度和深度的明显变化。

一般在叠层实体制造工艺中，激光的切割速度在150～500 mm/s之间。如此高的速度，在切割轨迹线段的加速过程以及折线拐弯处的速度变化大且距离长，如图6.6-30所示。v_1 表示正常的切割速度，P_1 表示正常切割时的激光功率，P_1 与 v_1 必须配比。t_1 表示加、减速过程所需的时间，当 $v_1 = 150$ mm/s，$a = 3\ 000$ mm/s^2 时，$t_1 = 0.05$ s。加、减速路径的长度为 $s_1 = 3.75$ mm。

理想的切割过程，应该是在切割路径的全程保持激光功率与速度的匹配关系 D 的恒定，尤其是加速减速阶段。这样切割出来的切缝是等宽、等深的（见图6.6-31a）。但当激光功率与速度没有实时匹配控制时，在加、减速阶段就会造成严重的过烧、过切现象，在切割路径的头尾处产生“火柴头”（见图6.6-31b）。“火柴头”现象在各类叠层实体制造系统上都不同程度地存在。

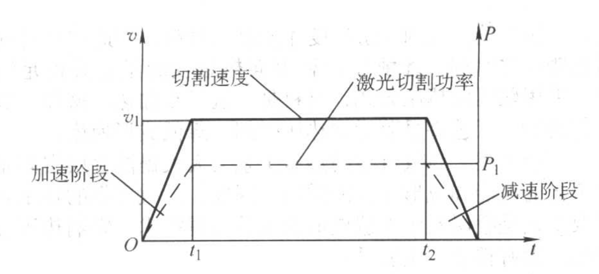


图6.6-30　激光功率与切割速度的理想匹配

t_1 为加速时间，一般为0.04～0.05 s

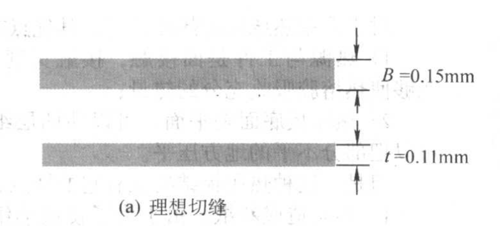


图6.6-31　激光切缝示意图

为了消除“火柴头”现象，提高激光的切割质量，需要解决激光功率与切割速度的实时匹配控制问题。方法是建立切割速度对激光功率的直接控制。其原理是：实时提取切割速度的脉冲信号，通过速度/电压转换器，将速度信号转换为驱动电压信号去控制激光电流的实时变化，从而控制激光功率的实时变化，实现激光功率与切割速度的实时匹配。图6.6-32是在M－RPMS和SSM－500设备上实现的激光功率与切割速度实时匹配控制的原理图。

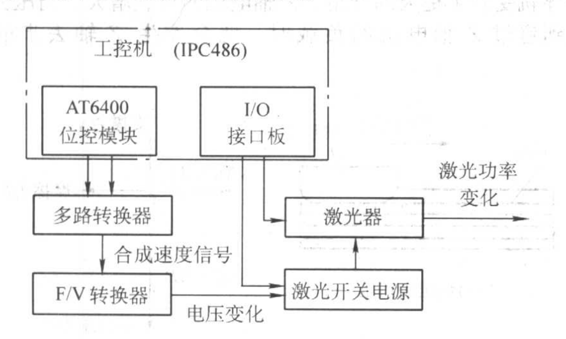


图6.6-32　激光功率与切割速度实时匹配控制原理图

这种控制方式能满足：

1）激光快速开关控制，开关时间小于1 ms；

2）激光功率与不同的切割速度的匹配；

3）在数控扫描加减速过程中，激光功率实时改变，与速度实时匹配。

在这种控制方式中，速度信号提取利用的是数控系统三轴插补的功能，从第三轴上提取与切割速度（X、Y 轴的合成速度）成线性比例的速度信号，将速度（频率）信号转换成同频率的方波信号，送到F/V转换器，实现快速转换（转换时间小于1 μs），从而得到与切割速度成正比的驱动电压，去实时控制激光电流的变化。

图6.6-33显示了实验测得的激光功率与切割速度实时匹配的关系曲线，从中可以看出，两个关系曲线基本吻合。从激光切割的实际结果可以看出，切割质量大大提高，而且“火柴头”现象基本得到了解决。

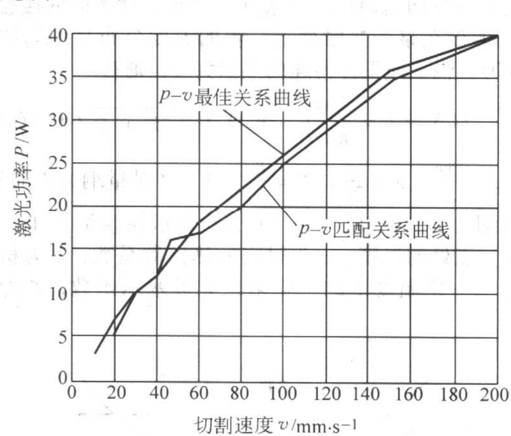


图6.6-33　激光功率与切割速度实时匹配的关系曲线

4.2　热压工艺

在叠层实体制造工艺中堆积过程由热压工艺完成。利用热压装置将涂敷在纸带表面的热熔胶熔化，再进行碾压黏结，将纸带与已成形部分黏结在一起。因此热压工艺是叠层实体制造工艺中极其重要的环节，它的好坏直接影响零件的成形，关系到工艺过程的许多方面：

1）黏结质量　零件的层片是靠热压黏结在一起的。因此要求在加工区域内各处材料必须牢固地黏结，而且在成形过程中始终保持热压工艺的可靠，否则就会使材料在有的地方黏结牢固，有的地方黏结不牢；有些层粘得好，有些层粘得不好，这些情况都将导致成形失败。

2）翘曲变形　由于材料的堆积是靠热熔胶的熔化黏结实现的，热熔胶在冷却固化过程中由于体积收缩引起的收缩应力随着零件的层层堆积而不断积累；另一方面由于只对工件顶端的新层施压加热，随着工件高度逐渐增高，工件各部分的温度将随着造型过程的进行而变化，温度的变化在零件内部引起热应力。当内应力足够大时，使工件产生翘曲。

3）加工成形速度　由于叠层实体制造技术使用的原材料——纸或其他薄片材料大多是热的不良导体，导热性较

差。而热熔胶需达到一定温度才能黏结材料。因此加热过程需耗费一定时间，才能使材料表面热熔胶的温度升得足够高。采用碾压的热压方式，材料是分区逐步加热。这样，效率低的加热工艺将显著增加热压时间，降低成形速度。

综合上述，高效可靠的热压工艺会大大提高叠层实体制造工艺的性能和成形零件的质量。因此，高效可靠的热压装置及工艺是叠层实体制造成形设备的关键技术。影响热压过程的因素有很多，主要是：

1）热熔胶性能　材料最终是靠热熔胶黏结起来的。热熔胶的黏结力、黏性、黏结温度等性能指标对热压工艺无疑是极重要的。

2）热辊温度　目前各公司的叠层实体制造系统多以热辊方式加热。热辊是热压的热源和施压件，它的温度对工件构成一个向工件导热的温度梯度。而热压过程实质上是一个导热过程，热压过程的优化就是追求一个高效、可靠的导热过程。热辊温度在这个导热过程中起着致关重要的作用。

3）热压速度　对于采用碾压方法加热新层的叠层实体制造工艺，碾压的速度也是一个主要的影响因素。

此外，还有热熔胶涂覆质量、胶层的厚度、基纸的性能、热压辊半径、压力等因素。下面对热辊碾压的导热过程进行分析，以便使读者更加深入地了解热压工艺及其影响因素。

取碾压过程的某一横截面，如图 6.6-34 所示。热压辊以速度 v 自左向右碾压工件表面，辊与工件表面的接触宽度为 $2h$。假设在整个接触面上，辊的温度分布是均匀的，为 T_{MAX}（0）。辊子向工件传递的热量为 q，则有

$$T(X,Z) = \frac{2q\alpha}{\pi k v}\int_{X-H}^{X+H} e^{-\zeta} Y_1\left(\sqrt{Z^2+\zeta^2}\right) d\zeta \quad (6.6\text{-}13)$$

式中，$X=\frac{xv}{2\alpha}$；$Z=\frac{zv}{2\alpha}$；$H=\frac{hv}{2\alpha}$。X，Z 是量纲为 1 的坐标；H 为量纲为 1 的宽度；T（X，Z）表示在量纲为 1 的坐标（X，Z）点处的温度；α 为材料的热扩散系数；k 为材料热阻；Y_1 为一定温度下的一阶第二类贝塞尔函数，ζ 为积分变量。

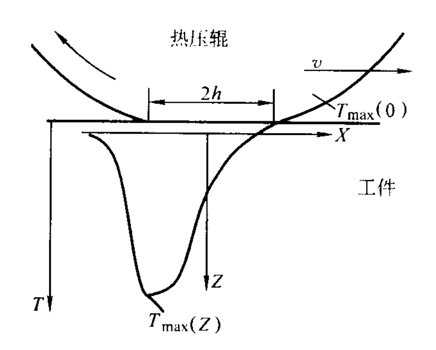


图 6.6-34　热压辊下的温度分布

根据式（6.6-13）可得到沿 X 轴（即碾压方向），温度 T（X，Z）的分布。在 $X=-H$ 处有最高温度 T_{max}（Z），当工件表面温度为 T_{max}（0）时：

$$T_{max}(Z) = T_{max}(0)e^{-Z\sqrt{\frac{v}{2h\alpha}}} \quad (6.6\text{-}14)$$

式（6.6-14）表明，工件表面温度 T_{max}（0）与一定深度 Z 处的温度成正比。为了提高热压效率，可以通过提高工件表面温度的方法来实现。但要提高工件表面温度，就得提高热压辊的温度。而热压辊的温度若过高，会对周围零件产生较大的热影响。另外，随着热压辊温度的升高，工件温度对热压速度的敏感性增加。热压速度稍有变化，热压质量就会受到影响，在热压辊加减速和换向阶段，热压速度相对较低，极易造成局部过热，甚至出现将工件烤焦的现象。

若令
$$t=\frac{2h}{v} \quad (6.6\text{-}15)$$

t 表示工件某一点接触热压辊的时间，则

$$T_{max}(Z) = T_{max}(0)e^{-Z\sqrt{\frac{1}{t\alpha}}} \quad (6.6\text{-}16)$$

由式（6.6-16）可知：工件表面接触热压辊的时间 t 越大，在一定的深度 Z，热压峰值温度 T_{max}（Z）越高。这说明工件表面接触热压辊的时间越长，导热效率就越高。如果能保证足够的接触时间，热压工艺的导热过程就能把足够的热量传到工件内部，从而保证热熔胶可靠地黏接，而热压辊的温度则不需要太高。这就避免了工件温度对热压速度过于敏感的问题，保证了可靠、安全的热压过程。

叠层实体制造工艺成形设备的热压方式有两种，即热压板和热压辊。这两种热压方式的受力示意图如图 6.6-35 所示。

对于采用热压板的热压工艺，其优点在于：

1）热源与工件是面接触，接触宽度宽，热传导充分，能够使热熔胶吸收充分的热量；

2）热压板底面是平面，可以使两层纸接触充分，并且可以把部分不平的地方压平。

但是，这种热压板结构也有它的缺点，主要表现在：

1）容易造成断纸。由于为了使成形纸接触充分，热压板上施加了比较大的垂直压力 G，如图 6.6-35a 所示。而热压板和成形纸之间是滑动摩擦，摩擦力 F，加上热压板前缘斜面生产的斜反力 P 的水平分量，使成形纸受到与热压速度同向的水平力。这个力推动着成形纸跟随热压板一起移动。当热熔胶处于熔化状态，表层纸和下一层纸的黏结力还不强，若正好遇上纸有缺陷，就可能造成断纸的事故。

2）热压压力过大。由于热压板和成形纸之间是面接触，为了使整个面上都接触到，就必须加大垂直压力 G。而压力 G 增大，一方面是增大了水平推力 T，另一方面也就使 Z 轴导轨受到了更大的弯矩，Z 轴电机的负载增大。当压力 G 大到超过 Z 轴电机的负载时，就会发生 Z 轴丢步的现象。

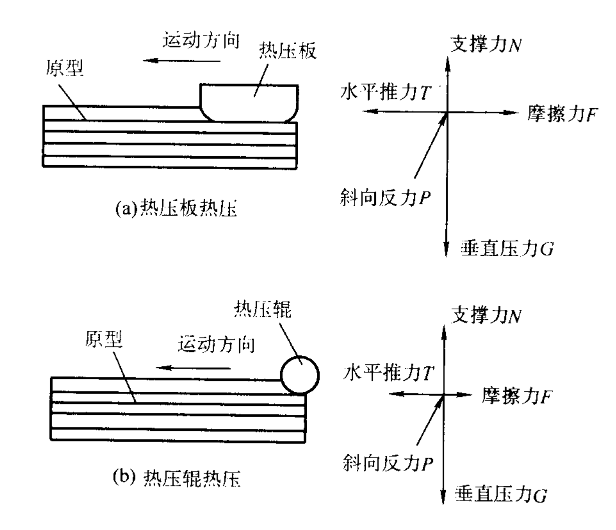


图 6.6-35　不同热压方式下成形纸受力情况示意图

对于采用热压辊的热压工艺，其的优点在于摩擦力小。因为热压辊与成形纸是线接触，它和成形纸之间的摩擦为滚动摩擦，摩擦力比采用热压板的滑动摩擦力小得多，如图 6.6-35b 所示，进而减小了成形纸所受的水平推力 T。

热压辊的主要缺点在于：

1）热传导性能较差　由于与成形纸是线接触，接触宽



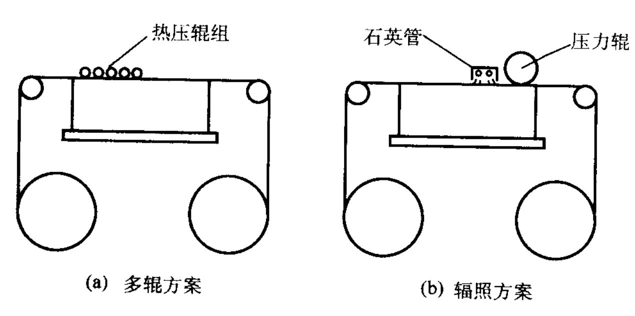
度窄，热传导不够充分，热熔胶有可能来不及熔化；

2）当成形纸面不平时，不能够加力使之变平，只能维持原状。

如上所述，这两种热压方式都有各自的特点。对于热压板来说，滑动摩擦是其最大的问题；对于热压辊来说，热传导不够充分是其最大的问题。

对于热压板热压工艺，一方面可以通过在底面涂覆低摩擦系数的材料，如聚四氟乙烯等降低摩擦力；另一方面改变黏结剂的性能，使之在热压过程中能迅速固化，减小摩擦力对成形纸的影响。

而对于热压辊的情况，为了提高热压效率，可采用多辊方案和辐照方案进行改进。多辊方案（图6.6-36a）通过增加热压辊的数量来提高热压效率，将原来的一个加热辊，改成一排多个加热辊。辐照方案则是将热压工艺中的加热过程和加压过程分开（图6.6-36b）。辊子是凉的，只对工件表面施压，而用热辐射石英管对工件表面进行辐射加热。由于石英管的温度可达900℃以上，加热效率大大提高，而且不受辊子接触宽度的影响。



(a) 多辊方案　　(b) 辐照方案

图6.6-36　热压辊热压工艺的改进方案

4.3　叠层实体制造工艺中零件的变形

在叠层实体制造工艺中，在加工中和加工后的零件变形是最大的质量问题。特别是在制造大型原型零件时，往往会出现较大的翘曲。当零件的变形发生在加工过程中时，会严重妨碍工艺的正常进行，致使加工过程中断，甚至引发火灾。本节将分析造成零件变形的原因。

3.3.1　原型变形的形式

在大量叠层实体制造工艺实践中，发现常见的原型变形有六种形式，并可分为两大类（见图6.6-37）。

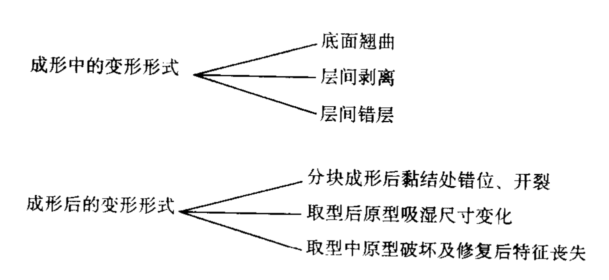
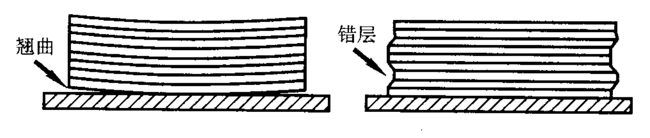
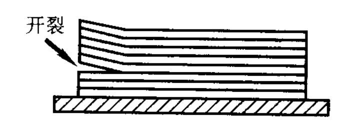


图6.6-37　常见的原型变形形式

图6.6-38显示了三种成形过程中的零件变形形式，它们是工件底部与支撑底板分离（图6.6-38a），发生翘曲；工件的各层轮廓发生偏移，出现层间错层（图6.6-38b）；图6.6-38c工件的相邻两层分离，发生层间开裂。图6.6-39则显示了另外三种在零件加工完以后出现的变形情况。图6.6-39a由于分块成形，在拼结时发生错移；图6.6-39b由于环境的温度和湿度的变化影响，造成原型零件的尺寸变形；图6.6-39c由于零件上的特征过于细小，在取型时被破坏，造成特征丧失。

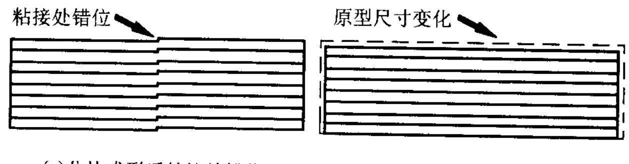


(a) 工件的底部翘曲　　(c) 工件的层间错层

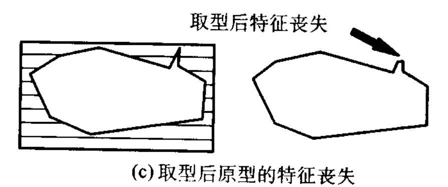


(b) 工件的层间剥离

图6.6-38　成形过程中的变形形式示意图



(a)分块成形后粘接处错位　　(b)由于环境影响原型的尺寸变化



(c)取型后原型的特征丧失

图6.6-39　成形后的变形形式示意图

3.3.2　造成原型变形的因素

叠层实体制造工艺中，原型的变形是在多种因素的影响下产生的。这些因素之间又相互影响、相互作用，纠缠在一起。因此对零件变形的控制需要考虑各种因素，采用多方面措施，综合解决。在长期的叠层实体制造工艺实践中，总结出了造成原型零件变形的八个主要影响因素。

1）成形材料（成形纸和热熔胶）的影响　原型是通过热熔胶将成形纸黏结而成形的。所以热熔胶和成形纸的性能对整个造型过程都有着很大的影响。

通过观察成形过程可以知道，在加工过程中热熔胶存在着加热膨胀、融化流动、冷却凝固收缩的过程。热熔胶在从液态向固态相变时会引起体积的收缩而产生应力应变。一般在温度变化不大时，物体的收缩量是与其温度变化量成正比的，近似为

$$\Delta\varepsilon = \alpha \times \Delta t \tag{6.6-17}$$

其中，$\Delta\varepsilon$ 为应变量，α 为应变系数，Δt 为温度变化量。叠层实体制造工艺中热熔胶在固化后，温度要下降40～50℃，这将引起很大的热应力。

另外，在加工过程中成形纸也存在着热胀冷缩现象，会在原型内部产生很大的热应力。如果成形材料（如：成形纸）不够致密，热熔胶在热压的时候就会渗透进成形材料里面。而在两层成形材料之间留下很少的热熔胶，导致黏结效果不理想。

成形材料，特别是成形纸的含水量也是影响成形质量的因素之一，当成形纸的含水量过高时，在热压板热压前后的含水量变化很大，也会使工件的截面积发生变化。而这个变化又受到热熔胶和已成形旧层的约束，这样就会在工件内部产生不小的应力。

工件各层之间的连接部分，即黏结剂的黏结，是原型中的薄弱环节，强度较低。如果不能牢固、可靠黏结，原型往往会在粘结缺陷处开裂。

2）原型尺寸的影响　原型尺寸，尤其是热压方向上的

尺寸，对成形件的黏结质量有至关重要的作用。在叠层实体制造过程中，当新层堆积在已成形的旧层上时，就在内部形成了残余应力。这个残余应力会引起了两层之间的弯曲。但是在实际造型中，当原型在热压方向上的长度小于 400 mm 时，这个问题基本显现不出来。而当原型尺寸增大，尤其是当热压方向上的尺寸超过 800 mm 以后，层间的黏结面积增大，片层材料的可靠黏结与原型的变形控制变得十分困难，变形现象就显得特别突出。它不仅影响了零件的精度、强度，而且还严重影响制造过程的正常进行。

3）基础层制作的影响　通过叠层实体制造的实践和力学计算得知，开裂或翘曲变形最容易发生在原型的底面附近，而此处正是原型的基础层所在。基础层包括双面海绵胶与胶木板的黏结面、涂覆纸与海绵胶的黏结面以及涂覆纸与涂覆纸的黏结面等三个黏结界面（见图 6.6-40）。因此如何改进提高几个界面的黏结力和处理好基础层的制作对于控制原型的整体翘曲变形是最重要的。

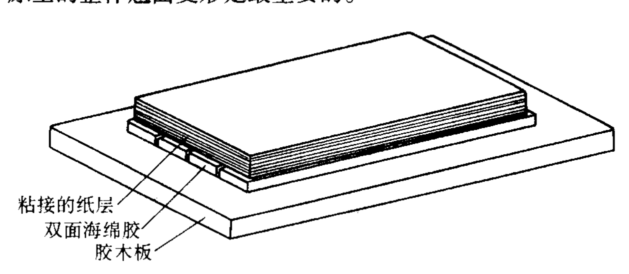


图 6.6-40　基础层组成示意图

4）热压工艺的影响　在热压过程中，热压方式的选择是关键问题。原型在热压板经过时局部受热膨胀，然后冷却收缩。这种热胀冷缩的循环过程在制造过程中始终存在，造成局部应力应变，而使原型发生翘曲。

另外在热压过程中热压板还会使原型受到周期性的机械压力。成形材料与热压板之间在热压过程中是过盈配合的，因此这两者间将还会产生很大的摩擦力，迫使材料拉伸变形，见图 6.6-41。大量的工艺实验完全证明了这一点。在热压之后，可以明显地看出成形纸被搓起，成形面上往往留有褶皱。四个角是应力集中点，热熔胶的黏结作用已不能束缚变形了，造型过程根本无法进行。

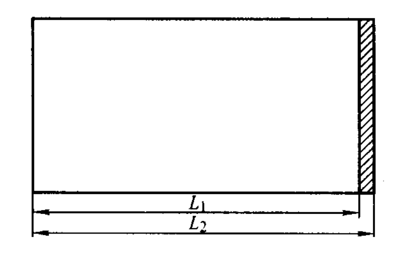


图 6.6-41　热压区域成形纸受热压摩擦拉伸后的长度变形示意图

L_1—热压前热压区域成形纸的长度；

L_2—热压后热压区域成形纸的长度

此外热压参数的匹配也很重要，即热压速度、热压温度和热压压力三者之间的匹配关系。如果热压速度过快，而热压温度不够高，那么热熔胶还来不及融化，两层纸之间的黏结效果就不好；如果热压速度过快，同时热压温度也很高时，热熔胶完全融化，成为液态，这时由于热压板的摩擦力作用，成形纸就发生了滑移；如果热压压力很低，成形纸上各点的接触不完全、充分，会导致成形纸在局部区域粘不上；如果热压压力很大时，成形纸发生了很大的变形量，残余应力加剧。

5）外部环境的影响　外部环境对于原型变形的影响因素包括成形中的环境（成形室）温度和取型后成形件所处外部环境的温度、湿度的变化等。外部环境的影响主要取决于成形材料的性质，包括涂覆纸和热熔胶的性能。

6）走纸工艺的影响　走纸操作会在涂覆纸中造成机械的拉应力，使涂覆纸产生拉应变，在加工过程中使原型收缩变形。

7）后序处理的影响　成形完成后零件的变形主要是原型中残余应力引起的翘曲，这种翘曲变形往往比较缓慢，经历较长的时间。这主要是由于成形完成后，原型内积累的应力要释放，而叠层实体制造所用的成形材料（涂覆纸）的特性是依赖于时间和温度的。其变形的计算可从材料的蠕变模型中获得。但是这个变形过程是缓慢的，可以通过上胶、上漆等手段进行控制，还可以在原型变形之前就使用它。

8）激光扫描的影响　原型的层面成形是通过激光切割成形材料来实现的。激光的切割过程是一个使涂覆纸汽化的过程，这个过程会在原型中产生热应力，使原型产生变形。但由于激光光束停留在某一位置的时间非常短，并且整个加工过程较长，可以认为加工过程是一个自然散热的过程，所以可忽略激光扫描对变形的影响。

上述八种因素对于零件变形影响是综合的，同时又常常交织在一起。其中走纸工艺、后序处理和激光扫描三个因素对原型零件变形的影响较小，且控制起来较容易；而成形材料、基础层、原型尺寸、外部环境和热压工艺五个因素是直接影响原型零件的变形和精度的。

通过上述分析可以看到，在这些因素中，最为关键的是工件内部的温度分布以及由温度变化引起的残余应力。在叠层实体制造工艺中，因热应力而产生的原型零件变形都有一个共同的特点，就是其变形的趋势都是向上翘曲，即向层片材料堆积的方向翘曲。图 6.6-42 显示产生这种翘曲的原因。

考虑相邻的 n 和 $n-1$ 两层，层 n 在层 $n-1$ 的上面。当热压辊或热压板对工件进行热压时，层 n 和层 $n-1$ 都被加热并伸长。但由于上面的层 n 比下面的层 $n-1$ 更靠近热源，它的温度较高，伸长量也更大。此时，层 $n-1$ 对于层 n 产生了一个相对的收缩变形，而层 n 对于层 $n-1$ 产生了一个相对的拉伸变形。如图 6.6-42a、b 所示。当加热过程温度还比较低时，黏结剂的黏度较大，层 n 与层 $n-1$ 通过层间黏结剂的作用相对变形就会产生一个层间力 F_n（图 6.6-42a）。F_n 对于层 n 是向里收缩的，而对于层 $n-1$ 则是向外拉伸的。这个力产生的工件翘曲是向下弯曲，与图 6.6-38a 所示的变形刚好相反。

随着加热过程的继续，层片材料与层间的黏结剂的温度升高，黏结剂的黏度降低，黏结力变弱，层间的作用力也随之减弱，甚至完全释放，各层可自由变形。此时，F_n 也就不复存在。如图 6.6-42b 所示。这就是在热压过程中实际没有成形工件向下翘曲的原因。

当热压辊或热压板移开，工件开始冷却。由于冷却时的热量大部分是由上表面丧失的，所以上面的层 n 比下面的层 $n-1$ 温度低，而且冷却快，温度下降幅度大。由此造成层 n 的收缩量比层 $n-1$ 的收缩量大，层 $n-1$ 对于层 n 就有一个相对的拉伸变形，而层 n 对于层 $n-1$ 有一个相对的收缩变形。见图 6.6-42c、d。当冷却过程刚开始时，工件的温度还比较高，黏结剂黏结力还比较弱，此时层间的相对变形还不能产生层间的作用力（图 6.6-42c）。而当工件温度下降到黏结剂的黏度足够高时，层间的相对变形就会通过黏结剂的黏结作用而产生层间的作用力 F_n。对于在上面的层 n，F_n 是拉伸的，而对于在下面的层 $n-1$，F_n 是收缩的（图 6.6-42d）。

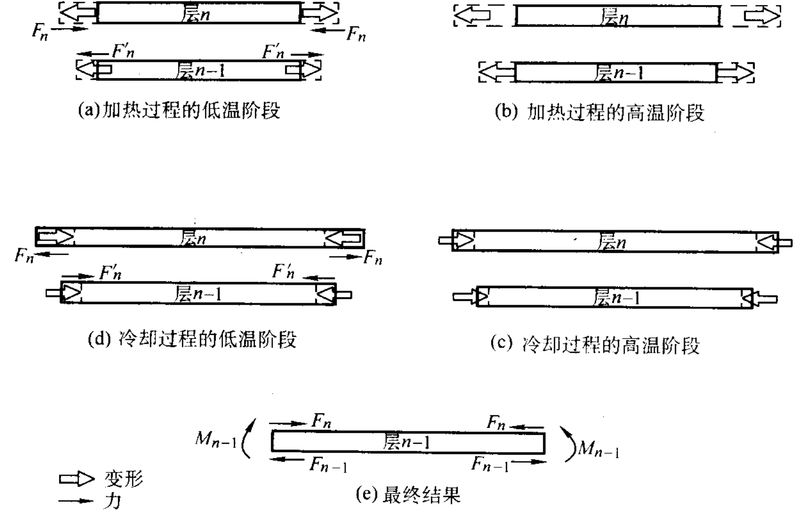


图 6.6-42　叠层实体制造翘曲弯矩产生原理图

在整个叠层实体制造的加工过程中，每次热压循环都会在工件的每一层间发生上述层间力的产生和变化。对于某一层（如：层 $n-1$）来说，其上表面受到层 n 的作用，生产了收缩力 F_n，而下表面受到层 $n-2$ 的作用，产生了拉伸力 F_{n-1}。这样最终的结果是层 $n-1$ 因热压的温度变化而产生了一个使其向上翘曲的力矩 M_{n-1}，见图 6.6-42e。工件中每一受到热压影响的层都会产生这样一个翘曲力矩，当翘曲力矩累积到超过层间或工件与支撑底部的黏结力时，工件就发生了翘曲变形。

通过上面的分析可以发现，造成工件翘曲的力矩是由于叠层实体制造过程中层间的热变形不均匀和黏结剂在高低温区间的不同特性造成的。进一步的研究表明热压温度影响着翘曲的产生。当热压温度较低时，翘曲力矩会迅速积累，很快导致工件的变形；而当热压温度合适时，翘曲力矩在每个热压循环都可以得到释放，不发生累积，始终保持较低水平，直至原型加工完成。

因此叠层实体制造工艺中热压过程工件内部温度的变化和分布变化规律，对于减小和控制原型的变形，提高原型质量是至关重要的。

4.4　温度场计算

为了更好地了解叠层实体制造工艺热压过程中工件内部的温度变化和分布规律，需对热压过程工件的温度场进行模拟计算。计算的简化模型如图 6.6-43 所示，模型为二维动态的，模拟一个加工循环，即铺上新层后的热压过程以及在下一次铺新层之前的散热情况。

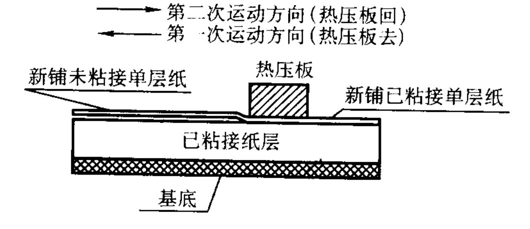


图 6.6-43　叠层实体制造工艺的热压加工过程示意图

不失一般性，热压装置以板式结构，以一定的速度来回两次压过新层。使层间的胶熔化并重新凝固。对实际工况进行了简化：

1）所加工的原型是由胶将纸逐层黏接起来的，但在分析中忽略纸和胶在热物理性能上的差异，假设原型是一个各向异性但均匀的连续体；

2）由于激光光束停留在某一位置的时间非常短，并且整个加工过程较长，可以认为加工过程是一个自然散热的过程，忽略激光切割对温度场造成的影响；

3）材料在宽度上受热均匀，虽然靠近边缘地方可能存在温度梯度，但与整个原型相比，其影响可以忽略，从而可以将三维非稳态导热问题简化为二维非稳态导热问题。

根据叠层实体制造工艺的加工过程，将一个加工循环分成三个阶段：第一次热压（热压板去）、第二次热压（热压板回）和切割轮廓（热压板静止）。

首先建立三个阶段的控制方程和边界条件。

阶段 1：第一次热压（热压板去）

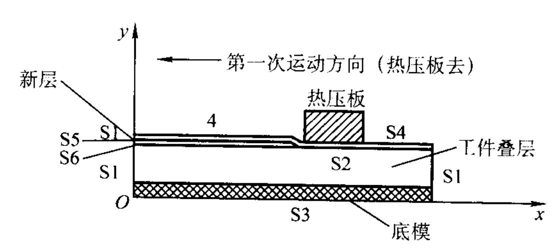


图 6.6-44　第一次热压（热压板去）的计算模型

计算的模型如图 6.6-44 所示。加工固定在坐标系上，坐标原点在工件的左下角。工件上部分是加工的叠层部分，下部分（图 6.6-44 中阴影部分）是支撑底板，即底模，在工件表面上有一新层，热压板由右向左移动。工件上按照传热特性的不同共有 6 个传热界面。其中：S1 为工件左右两面与空气的传热界面；S2 为热压板与工件的传热界面；S3 为底模与下方空气的传热界面；S4 为热压后的工件上表面与空气的传热界面；S5 和 S6 为新层和未热压工件上表面与空气的传热界面。

由能量守恒可以得到控制方程为

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} \qquad (6.6\text{-}18)$$

式中，k_x 是工件水平方向传热系数；k_y 是工件垂直方向传热系数；ρ 是工件的密度；c_p 是工件的比热容。

由于叠层水平方向的传热系数约是垂直方向的三倍，因此热压板运动过程以及激光加工过程对工件左右两个侧面 S1 的温度影响不大，两个侧面的温度与成形室的空气温度相同，则边界条件 1（界面 S1）：

$$T = T_c \qquad (6.6\text{-}19)$$

其中：T_c 为成形室空气的温度。

考虑到热压板比较大，而且热压板材料热传导率比工件热传导率高许多。假设热压板的温度为常数，并引入一个等效热传递系数 h_r［W/（$m^2\cdot K$）］来描述从热压板到纸层面的热量传递。将工件和热压板之间的边界 S2 当作一个对流边界传热界面。则有边界条件 2（界面 S2）：

$$k_y\frac{\partial T}{\partial y}=-h_r(T-T_b) \qquad (6.6\text{-}20)$$

其中：k_y 是工件垂直方向的传热系数；T_b 是热压板的温度；

底模的下表面与空气相接触，与成形室的空气发生对流换热。得边界条件 3（界面 S3）：

$$k_{tm}\frac{\partial T}{\partial y}=-h_3(T-T_c) \qquad (6.6\text{-}21)$$

其中：k_{tm}是底模垂直方向的传热系数；h_3 是底模和空气的对流换热系数；

工件上表面已热压过的部分，不与热压板接触，而与成形室内的空气进行对流换热。边界条件 4（界面 S4）：

$$k_t\frac{\partial T}{\partial y}=-h_4(T-T_c) \qquad (6.6\text{-}22)$$

式中，h_4 是纸层和空气的对流换热系数。

未经过热压的新层与工件尚未热压部分之间没有紧密结合，存在一层静止的薄空气，认为边界 S5 和 S6 上是绝热的。则有边界条件 5（界面 S5 和 S6）：

$$\frac{\partial T}{\partial y}=0 \qquad (6.6\text{-}23)$$

当热压板由右往左移动，热压过整个工件上表面后，热压的第一阶段结束。热压板立即回头，由左向右运动，对工件进行第二次热压，进入热压的第二阶段。

阶段 2：第二次热压（热压板回）（图 6.6-45）

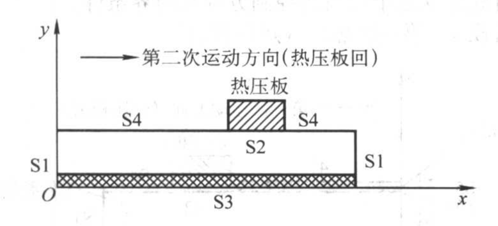


图 6.6-45　第二次热压（热压板回）的计算模型

在热压的第二阶段，工件内部的导热过程与第一阶段相同，因此控制方程与第一阶段相同。

由于新层已经与工件的旧层完全黏结，不再存在边界 S5 和 S6 了，因此第一阶段的边界条件 5 没有了。而其余的界面及其边界条件与热压的第一阶段相同。

当热压板完成了第二次热压，热压板停留在距离工件较远的地方。对工件的温度场影响可忽略不计。而此时叠层实体制造工艺的加工循环进入到轮廓切割阶段。

阶段 3：切割轮廓（热压板静止）（图 6.6-46）

在第三阶段主要是激光切割零件截面轮廓，依据前面的假设，切割过程，激光对工件的温度场不会造成影响。工件处在一个与周围空气对流换热的自然散热状态。

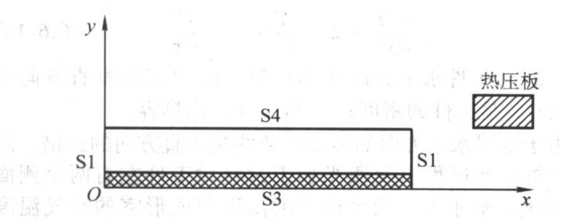


图 6.6-46　切割轮廓（热压板静止）的计算模型

由于没有热压板的作用，则前面与热压板接触的界面 S2 没有了。其余的边界条件和控制方程与第二、三阶段的相同。

控制方程式（6.6-18）是一个二维的扩散方程，有非常复杂的级数解，而且对边界条件等有严格的限制。可以采用有限差分法求其数值解。表 6.6-4 列出了温度场计算的工艺参数取值。在此参数下计算了工件温度场动态分布情况。图 6.6-44 显示了热压板移动到工件中间部位时的瞬时分布。

表 6.6-4　热压温度场计算的工艺参数

设 备 参 数	数值	计 算 参 数	数值
模型总长 L	800 mm	水平步长 h_x	2 mm
热压板宽 *Width*	73.7 mm	纸层垂直步长 h_{y2}	0.1 mm
热压板运动速度 v_x	40 mm/s	底模垂直步长 h_{y1}	1 mm
热压板温度 T_b	75℃	时间步长 h_t	0.1 s
成型室温度 T_c	25℃	纸层总数	100
激光加工时间 t_s	60 s	底模层数 N_m	10

图 6.6-47 中，垂直坐标表示温度，底面的 X 坐标表示工件的左右宽度，Y 坐标表示工件的高度。由图可以看到沿热压方向（即图中 X 轴方向）工件左右侧面的温度较低，中间的温度分布较均匀。沿工件的垂直方向（即图中 Y 轴方向）温度由上至下逐渐降低，但温度梯度不大。而在靠近工件顶面，温度的分布有较大的变化，温度梯度较大。

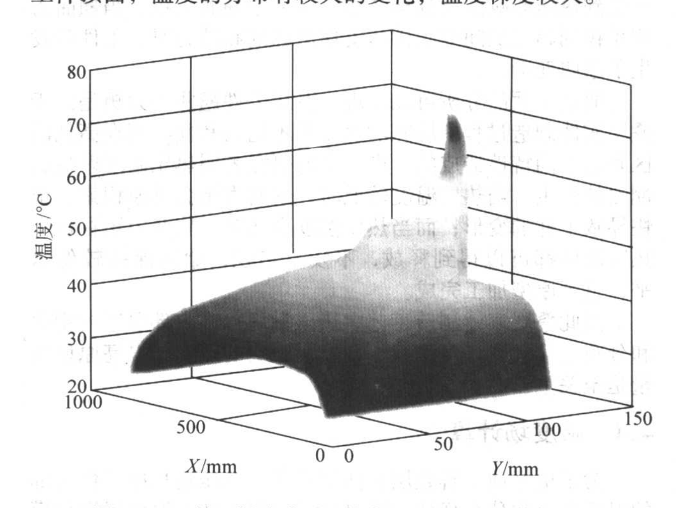


图 6.6-47　热压板移动到工件中间时的瞬时温度场分布

不同纸层的温度分布曲线

图 6.6-48　工件顶部不同层的温度分布曲线

图 6.6-48 显示了靠近工件顶面 0~17 层的温度分布。如



图所示，最顶层（即 0 层）的温度受热压板的影响最大，其温度的升降幅度可达 30℃。自顶层向下，各层的温度变化逐层变小，说明受热压板的影响越来越小。当超过 11 层后，热压板的影响就非常有限了。

在工件的水平方向（即热压方向），第 0 层温度的最大值出现在热压板即将离开的位置。随着叠层深度的增加，层内最高温度所在的位置不断后移（相对于热压板的运动方向）。这是因为热量的传递需要时间，只有当上层的温度达到最大值后，下层的温度才能升到最大值。而在一定深度（如 11 层以下）温度起伏则明显减小，同一层内温度均匀基本分布。

在叠层实体制造工艺中有许多参数对工件的温度场有影响，如热压温度、热压板宽度（或热压辊与工件的接触宽度）、热压速度、成形室温度等。还有一些原型参数，如工件的尺寸、轮廓的切割长度等，通过影响热压工艺三个阶段的时间长短，影响工件的温度场。利用前面介绍的温度场计算手段，可以研究在各种工艺参数情况下的工件温度场分布及变化规律，并通过对温度场变化所引起的翘曲力矩和层间力的计算，寻找合适的工艺参数及其配合关系，以保证叠层实体制造工艺的顺利进行，保证原型零件的加工精度。

5　叠层实体制造技术的工艺改进

在快速成形技术发展过程中，降低制造成本、扩展加工范围、开拓应用领域、不断提高成形速度和质量是技术进步追求的目标。以大型快速原型为基础的大型模具的快速制造技术是快速成形技术的一个重要而影响深远的应用领域，它将有利地推动快速成形技术在汽车、家电等行业的应用，并将促进这些行业的产品创新，提高产品开发的效率和质量。

利用快速原型制造模具，尤其是制造大型模具，与传统模具制造方法相比具有加工周期短、可控性好、一次成功等技术特点，可以有效地缓解产品研制开发初期模具制造周期长、成本高的问题，是一项非常有前景的技术。然而，大型原型是实现大型模具快速制造的前提和基础，原型的大型化一直是制约这一技术发展的瓶颈。因此，研制和开发大型原型的快速成形系统和相关工艺改进是快速成形技术发展的重要方向之一。

在目前出现的各种快速成形技术中，叠层实体制造技术是最适宜制造大型原型的，这是因为叠层实体制造技术以面为基本成形单元，只须切割层片轮廓，而无需进行大面积的截面填充。在诸多快速成形工艺中具有最高的成形效率。

另一方面，叠层实体制造技术采用层片材料直接层叠，层叠快速、工艺性好。而且具有运行成本低、成形精度和强度较高等特点。

但即使叠层实体制造技术有这些优点，现有的叠层实体制造技术在制造大型原型还是存在着工艺上的困难。主要表现在切割效率和变形控制等方面。因此，进一步提高激光切割效率、更加有效地控制并避免工件翘曲变形是实现大型原型叠层实体制造工艺的关键性技术。

5.1　大型原型的分区平行加工技术

由前面的分析可知，进一步提高切割效率，是叠层实体制造技术实现大型原型制造的关键之一。为此，采用并行加工的概念，提出了分区加工的叠层切割工艺。

5.1.1　分区并行加工技术的基本概念

分区并行加工的原理如图 6.6-49 所示。当需要加工零件的 CAD 模型输入后，首先对其进行分层，计算出各分层截面的轮廓，即 CLI 文件；然后将每层截面轮廓分割出相互独立的加工区域，如左右加工区域，分别生成各区域的轮廓信息，即分割后的 CLI 文件；将这些 CLI 文件分别传送给独立的切割设备，如左右激光扫描装置，完成各自区域的轮廓切割，共同完成同一截面的轮廓和网格的切割；如此反复，直至所有截面全部加工完。

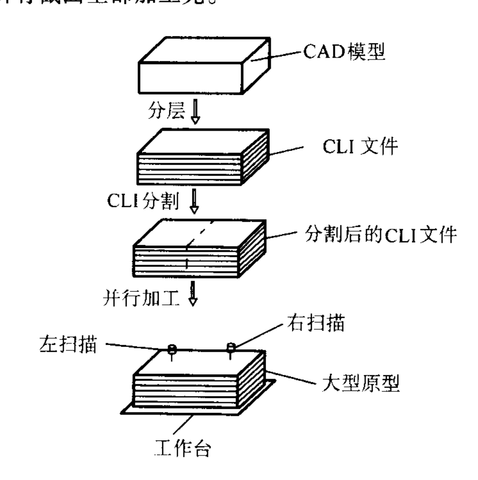


图 6.6-49　分区并行加工原理示意图

分区并行加工技术只将零件的几何数据进行分割，多套扫描装置共同加工，直接得到完整的大型零件原型，而不需零件的物理拼装。由于是多个扫描系统并行工作，使加工效率大大提高，并且零件的精度和强度可以得到保证。另外，通过增加更多的扫描系统还具有更快的加工速度和加工更大原型的潜力。

通过实际加工和计算，采用两套切割装置的分区并行加工方法可提高原型零件轮廓的切割效率 40%左右。

为了有效地应用分区并行加工方法，有三个最主要的技术问题需要解决：原型几何数据的分割、分布式控制系统和扫描机构的独立性设计。下面分别加以介绍。

5.1.2　零件几何数据的分割

零件几何数据的分割是分区并行加工技术的首要问题。在前面分区并行加工原理的介绍中，零件几何数据的分割是针对层片轮廓数据 CLI 文件的。实际上几何数据的分割可以发生在快速成形数据处理的各个过程中，如零件 CAD 模型、零件 STL 模型、层片轮廓数据 CLI 模型以及填充后的轮廓数据等。不同的加工工艺和不同的设计思想，可以采用不同的分割策略。

1）CAD 模型的分割　零件的 CAD 模型是指零件的 CAD 造型系统中的模型，对 CAD 模型的分割可在 CAD 设计造型阶段进行，如图 6.6-50a 所示。此时需要破坏零件 CAD 模型，同时还存在分区加工工艺与模型分割匹配的问题，即 CAD 造型人员必须参与原型的快速成形制造，或快速成形加工人员必须参与 CAD 造型，这样会造成管理上的不必要联系，任意产生人为错误。

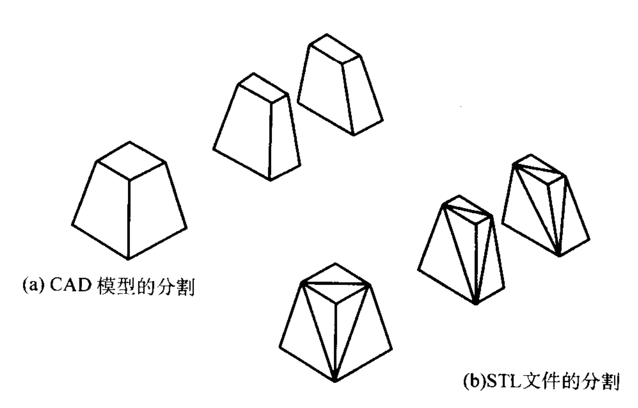


图 6.6-50　CAD 模型和 STL 文件的分割

2）STL文件的分割　CAD模型经表面三角形离散后得到STL文件。STL文件快速成形领域的标准数据格式，应用非常广泛。对原型STL文件也可以进行分区分割（见图6.6-50b）。即利用一个平面，对构成STL文件的三角形面片进行求交、分割；然后将切割平面与所有被切割的三角形面片的交点相互连接，构成若干二维的多边形；最后，将这些二维多边形构成的切割界面进一步划分为若干三角形面片，即对切割平面进行三角形重构，此时要考虑组成界面的若干多边形间的嵌套拓扑关系。

3）CLI文件的分割　CLI文件记录了原型各加工截面的二维轮廓数据，因此对CLI文件进行分割是一个二维几何形状的分割问题，比CAD模型、STL文件的三维分割简单。在分割中首先要对构成CLI文件的各多边形进行求交运算和分割；由于CLI文件中的截面轮廓还要用于填充路径的生成，要求各轮廓线封闭，因此需要对分割后的轮廓多边形进行区域封闭处理（如图6.6-51a所示）。因此也需要考虑多边形之间的拓扑关系，即环与环之间的嵌套关系。

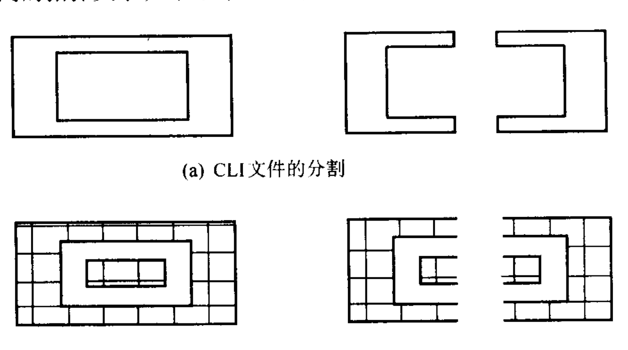


图6.6-51　CLI文件及填充后CLI文件的分割

4）填充后CLI文件的分割　在原型截面正式加工之前，对原型截面的轮廓数据要根据成形工艺要求进行截面填充（在叠层实体制造工艺中就是在截面外打网格）。快速成形设备据此自动生成数控代码，控制机器堆积成形。对填充后的CLI文件进行分割，不要求分割后的CLI数据必须封闭，不必考虑构成CLI文件的若干多边形之间的嵌套关系，可以将二维问题转换为一维问题，其算法较为简单（如图6.6-52b所示）。

从以上讨论可以看出，对零件的CAD模型、STL文件、CLI文件、填充后的CLI文件都可以进行分割。然而，零件几何信息的分割不仅是一个算法问题，也是一个工艺问题。对CAD模型、STL文件、CLI文件进行分割，都会生成新的界面，这个界面为两个分割部分所共有，因此在扫描加工中必然在分割界面处重复扫描切割两次，而在此处原本是不应该存在扫描线的。在并行加工技术中，如果在零件的中间连续扫描切割两次，必然会破坏零件的整体性，降低原型的强度。而对填充后的CLI文件进行分割，不仅不用考虑STL文件、CLI文件的拓扑关系，算法比较简单，而且在分割边界处不会产生多余的重复扫描线。因此对分区并行加工技术而言，零件几何信息的分割，选择对填充后的CLI文件进行分割比较有利，它一方面降低了数据处理计算的难度，另一方面也提高了零件的精度和强度。

5.1.3　并行扫描系统的分布式控制系统

分区并行加工对于叠层实体制造工艺而言就要有多套激光扫描系统并行工作，共同在系统控制计算机的指令下，独立完成各自区域的激光切割任务。考虑到减小系统的复杂程度，避免各扫描系统间不必要的关联，选用合适的数控系统组成分布式控制结构，是一个较好的扫描控制方案。组成分布式结构的数控系统必须满足以下几个基本要求：

1）数控系统与工控主机要具有良好的通信功能。可以高效地进行大量数据的传输，降低通信成本。数控系统还应该具有中断主机工作的能力，降低工控机的负担，使其在数控系统工作过程中，可以有效进行数据处理及设备监控工作。

2）数控系统要有足够的数据存储能力，至少应该具有可存储一层扫描加工数控代码的内存空间，以便降低工控机监控加工过程的复杂性。

3）数控系统要具有较强的数据处理能力，可以独立地执行大量的数控代码。

在实际应用中采用了美国PACIFIC公司生产的数控卡AT6400。该数控卡以计算机扩充卡的形式直接插在工业PC的总线上，与计算机具有良好的软硬件接口，与系统总线直接相连，并具有系统中断功能，可以与计算机进行快速通信。AT6400数控卡具有独立的CPU和其他数据处理单元，具有15 M内存，可以自主后台执行数控代码。这样在扫描加工时，系统控制计算机向各数控卡一次传输一层的加工代码，各控制器后台工作，实现多套扫描装置并行加工。采用AT6400数控卡的分布式并行扫描系统的控制结构如图6.6-52所示。

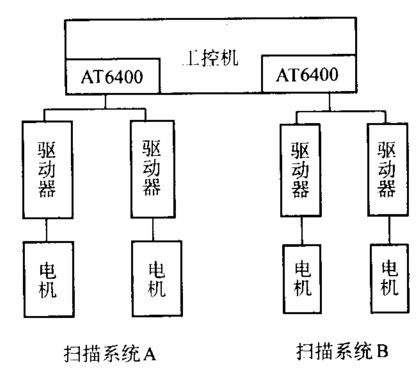


图6.6-52　分布式扫描控制系统

在应用AT6400数控卡实现并行加工时，需要对其数控代码进行合理的组织。AT6400数控卡处理数控代码的过程包括4个基本过程：接收、存储、编译、执行，这四个过程都需要数控卡上的CPU参与（见图6.6-53）。需要按照并行加工的独立性要求，将上述四个过程独立起来。

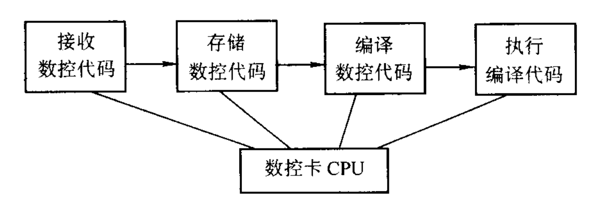


图6.6-53　AT6400数控卡数控代码的处理过程

根据AT6400的代码特点，将所有的轮廓切割数控代码的定义、编译指令写在一起，将执行指令写在一起。程序段一次性下载到AT6400数控卡上。在需要进行扫描时，向数控卡发出运行指令，扫描系统开始逐行执行指令，完成分区的轮廓切割和网格切割。代码执行完后发送删除指令，删除执行完的数控代码，为新代码留出存储空间。

数控代码是在走纸、热压和工作台调整的过程中，分别向两套数控系统发送的。由于只需要执行接收与存储工作，数控卡下载代码的过程在极短的时间内就可完成，不会原型其它加工过程。而在扫描过程中，各数控卡独立执行各自区域的轮廓和网格切割指令，不需与控制计算机进行实时通讯，数控卡间不会相互干涉。而控制计算机在扫描加工过程也有充足的时间来完成数据处理、参数管理以及设备监测等



工作。

5.1.4 并行扫描机构的独立性设计

在叠层实体制造工艺中实现分区并行加工技术，除了上述并行控制系统的独立性问题外，还存在着扫描机构的物理干涉问题，即扫描机构的独立性问题。由于轮廓和网格切割是由激光扫描机构完成的，而普遍采用的扫描装置为绘图仪式的二维直线驱动形式。这种形式扫描系统装置的扫描范围一般都小于扫描机构本身在扫描平面上的投影面积。这是因为存在导轨、丝杆等直线运动机构以及这些机构在有效行程外必需的额外安全行程的原因。在扫描相互邻接的区域时，扫描机械结构必定会发生干涉。若采用分层结构，两个扫描机构错落叠置，虽然可以避免机构的干涉，但上下扫描头（激光聚焦镜）也会发生相互遮挡的问题，给系统造成不必要的复杂性。

解决上述问题的方法之一是将扫描范围移出扫描机构的投影面积，使各扫描机构的扫描范围在其投影面积之外对接，以避免机构的干涉和聚焦镜的遮挡。具体实现是通过将激光聚焦镜倾斜一定角度，如图 6.6-54 所示。

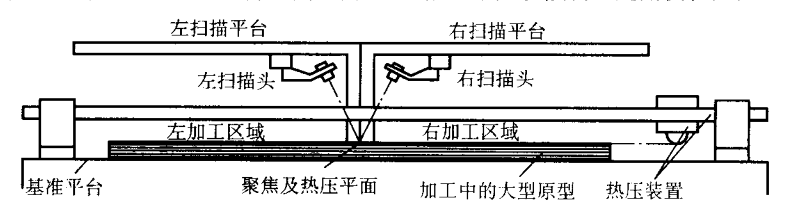


图 6.6-54 加工切割机械干涉的解决

在图 6.6-54 所示的机构设计中，左右两个激光扫描机构在同一层面上，并排安装。为了避免与热压装置的干涉，两个扫描机构安装在较高位置。扫描机构中的聚焦镜相向倾斜，其最大行程位置的焦点相互邻接。但由于聚焦镜倾斜后焦点光斑会发生稍许变化，呈椭圆状。这会造成 *XY* 两方向的切割参数变化，使两方向的切缝宽度不一致，影响轮廓切割的精度。因此需要控制倾斜角度，兼顾倾斜角和扫描机构各部位的尺寸，必要时可加长焦距，以便留出足够的空间。保证光斑的变化限制在可接受的范围，不原型激光切割工艺和原型精度。

将激光聚焦镜倾斜一定角度，避免了分区并行加工时扫描机构的干涉，使两套扫描机构可独立、并行地工作，保证了各扫描机构的独立性。

解决了上述技术问题后，分区并行加工技术就可应用于大型原型的快速成形制造中了，它不但提高了层片加工的效率，而且还提高了原型的精度和强度。但要顺利、可靠地制造出大型原型，还必须解决大型原型的热压翘曲问题。

5.2 减小翘曲应力的预分割方法

根据叠层实体制造加工的经验和前面的分析，随着原型零件尺寸的增大，热压引发的工件翘曲变形的趋势越来越严重。当原型尺寸大到一定程度后，翘曲的发生几乎是不可避免的，特别是大型原型的制造，工件翘曲是最大的障碍。因此，大型原型零件的制造必须解决热压工艺引起的翘曲变形问题。

解决翘曲变形可采用的方法很多，如提高热压温度，增加保温措施，改进成形材料等。本节将介绍另一种方法，即预分割方法。

由于工件的层间应力随着叠层尺寸的增大而增大，在制造大型原型时，为了防止原型在制造过程中发生变形，可以想办法把较大的叠层转换为较小的叠层，使层间应力控制在较低的程度，避免翘曲变形的产生。根据这一思想，在叠层实体制造大型原型时，在热压前沿成形纸的长度方向对它预先分割，使叠层黏结长度缩小，以达到较小层间应力的目的。这种方法称之为预分割快速原型制造方法。

预分割快速原型制造方法的特点是：在新的成形纸和已有成形纸层黏结之前，先用激光将新成形纸用指定的网格线方式进行预先的分割，使它变成多个互有关联而又独立的小部分。由于大的成形纸被间接的分成一些小的部分（<400 mm），所以就能较好的控制零件的变形，不再容易出现弯曲开裂等现象。

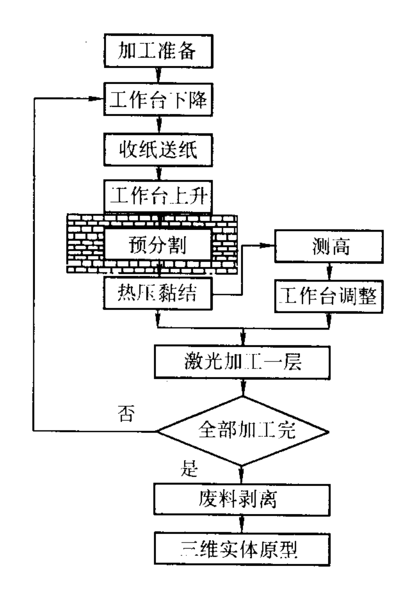


图 6.6-55 预分割快速原型制造方法原理框图

预分割快速原型制造方法的工艺流程如 6.6-55 所示，它包括以下步骤。

1）加工准备，包括数控系统初始化及 *XY* 轴回原点，*Z* 轴测高回焦平面。

2）工作台下降。

3）收纸和送纸，使新的成形纸移动到工件上方。

4）工作台上升。

5）根据设定的预分割网格方式控制 CO_2 激光预切割。

6）热压系统移到工件上方，热压新的预切割后的成形纸，将它与下面的已成形件黏结起来，添加一层新层。

7）热压系统热压完后，其上的测高装置根据工作台停止的位置，测出工件的高度，并反馈回计算机，同时工作台做相应的调整。

8）计算机根据当前零件的加工高度，计算出三维形体模型的交截面。交截面的轮廓信息输入到控制系统中，控制 CO_2 激光沿截面轮廓切割。激光的功率设置在只能切透一层材料的功率值上。轮廓外面的材料用激光切成方形的网格，以便在工艺完成后分离。

重复上述工艺过程 2）~8），直到所有的截面都切割并粘结上，所得到的是包含零件的方体。

9）将废料剥离，最后得到三维的实体零件。

预分割快速原型制造方法的思想是将引起翘曲变形层间应力局限在较小的区域范围之内，防止它在水平方向的积累，并使其得到释放。具体实施可采用多种形式，图 6.6-56 显示了两种常用的预分割网格：纵向连续网格和纵向间断网格。当新的一层成形纸输送到工件上方后，在热压切割前，根据设定好的网格间距（如图 6.6-56 中的 L1、L2），用激光沿纵向方向（也可任意方向）连续或间断地切割新的一层成形纸，形成一条条直线型刀缝。图中双点划线为工件边框位置（此时并未切割）。根据实际工艺的不同要求，可采用不同的网格形式来进行预分割，更多的网格形式在此不再列举，可根据具体情况灵活划分。

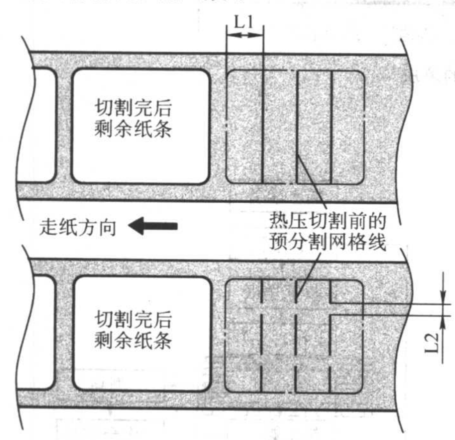


图 6.6-56 预分割的纵向连续（上）和纵向间断（下）网格形式

图 6.6-57 为预分割后工件的侧面示意图，从图中可看出工件在成形高度方向上的堆积情况。预分割的纵向网格是错落堆叠的，相同预分割网格的层数可根据具体情况在程序中设定。在同一层上，预分割网格也可采用不同的间距。这些都是为了防止在工件和原型零件被分割。

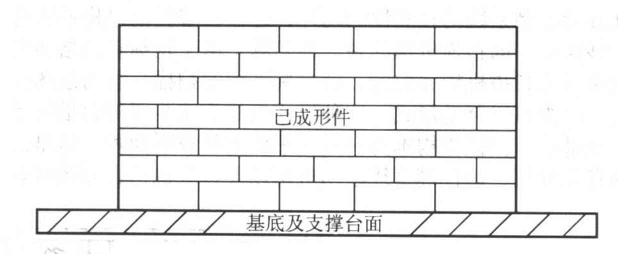


图 6.6-57 预分割后成形件的侧面示意图

由于预分割是在热压之前，此时成形纸尚未固定且不平整，这给激光切割带来不便。幸运的是预切割网格并不要求切割精度，仅要求能把一张纸切透，所以可通过调整切割速度和切割时功率匹配来满足要求。

下面是预分割技术在 SSM－1600 上进行的对比实验。原型尺寸为 1 300 mm × 330 mm × 50 mm（长 × 宽 × 高）。利用两种方法进行对比实验：原型 1 采用常规叠层实体制造工艺，在热压前没有打网格；原型 2 的制造过程采用预分割技术，即在热压前进行预分割网格切割。实验观察结果记录如表 6.6-5 所示。

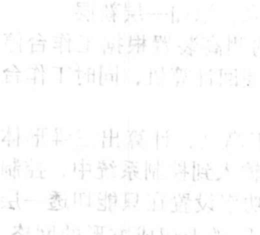
原型 1 未完成制造过程，中途失败，其未完成的工件如图 6.6-58 所示。

原型 2 由于采用来预分割方法，顺利完成了叠层实体制造过程。其造型完的工件如图 6.6-59 所示。工件的侧面（图 6.6-60）显露了预分割网格的纵向痕迹，可以看到错落的网格。最后的原型如图 6.6-61 所示。

实践表明，预分割技术可有效地降低大型原型的翘曲变形趋势，改善热压工艺引起的层间应力积累，提高原型精度，保证叠层实体制造工艺的顺利进行。预分割是大型原型快速制造的重要技术保障。

表 6.6-5 SSM－1600 上预分割设计对比实验观察

原型	热压速度	热压温度	热压压力	型长	黏结效果	变形情况	备注
1	60	230	0.5	1 300	连续造型几层后，远离热压板一端，有一个角发生黏结失败；继续造型几层后，其余各角及中间部位也发生黏结失败现象	当造型到 100 层时，整个原型两已经全部翘起，有 4、5 处开裂，无法继续	无预分割方式
2	60	230	0.5	1 300	在造型过程中，四个角一直黏结良好	造完型后，整个原型无变形	预分割式



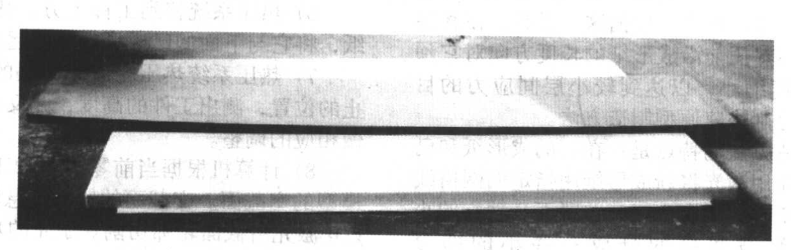


图 6.6-58 原型 1 的未完成工件照片

（清华大学激光快速成形中心提供）



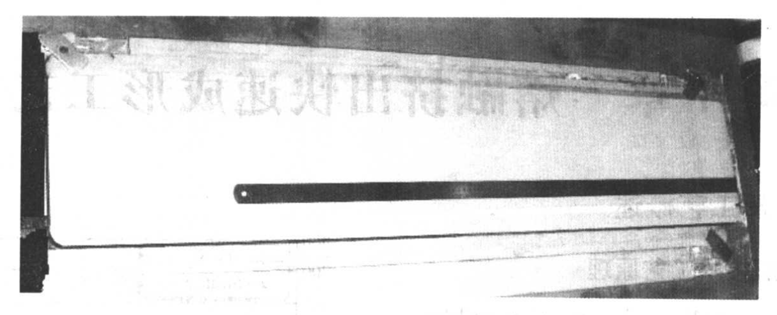


图 6.6-59　原型 2 造型后未取型的工件照片
（清华大学激光快速成形中心提供）

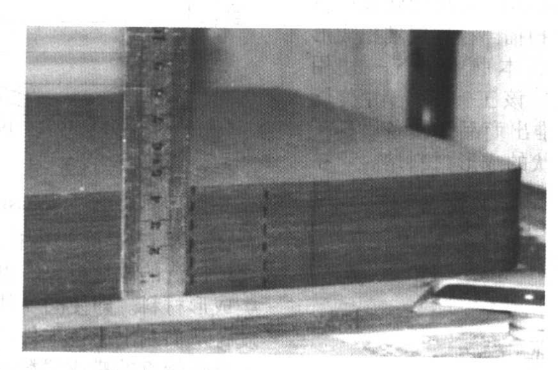


图 6.6-60　原型 2 工件侧面
（清华大学激光快速成形中心提供）

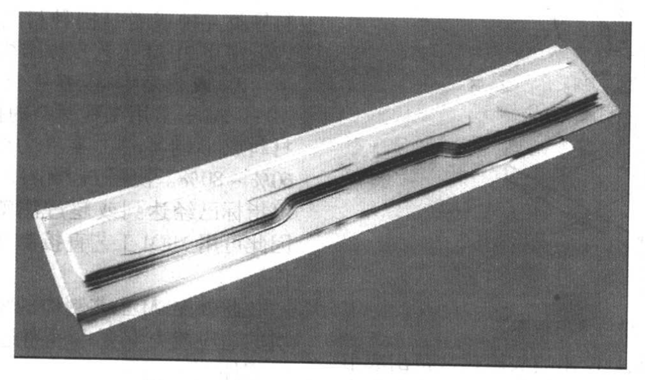


图 6.6-61　应用预分割技术制造的原型
（清华大学激光快速成形中心提供）

编写：林　峰（清华大学）

第7章 熔融挤出快速成形工艺

1 熔融挤出快速成形工艺概述

1.1 熔融挤出快速成形技术工艺原理

熔融挤出快速成形工艺MEM（melted extrusion modeling technology），又称熔融沉积成形工艺FDM（fused deposition modeling technology），是一种利用喷头熔融、挤出丝状成形材料，并在控制系统的控制下，按一定扫描路径逐层堆积成形的一种快速成形工艺。为统一起见，本书中将统一使用MEM工艺代表熔融挤出成形工艺。该工艺最先由美国Stratasys公司于1989年提出，并最先推出商品化设备。其工艺原理如图6.7-1所示。由喷头将丝状的成形材料熔融、挤出，喷头在x、y扫描机构的带动下沿层面模型规定的路线进行扫描、堆积熔融的成形材料。一层扫描完毕后，底板下降或者喷头升高一个层厚高度，重新开始下一层的成形。依此逐层成形直至完成整个零件的成形。

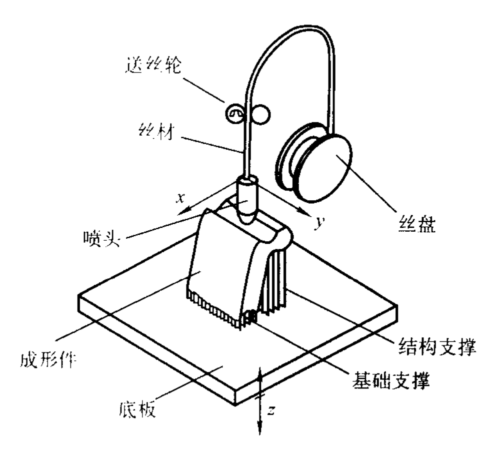


图6.7-1 微流喷挤技术原理图

MEM工艺的典型特征之一就是使用喷头熔化、挤出成形材料进行堆积成形；特征之二就是该工艺使用挤出技术作为使能技术，层与层之间仅靠堆积材料自身的热量进行扩散粘接。成形过程中，成形材料加热熔融后在恒定压力作用下连续地挤出喷嘴，而喷嘴在扫描系统带动下进行二维扫描运动。当材料挤出和扫描运动同步进行时，由喷嘴挤出的材料丝堆积形成了材料路径，材料路径的受控积聚形成了零件的层片。堆积完一层后，成形平台下降一层片的厚度，再进行下一层的堆积，直至零件完成。

1.2 熔融挤出快速成形技术的特点

熔融挤出快速成形技术是快速成形诸工艺中发展速度最快的成形工艺之一。熔融挤出系统的主要制造商Stratasys公司产品销售量增长过程（图6.7-2）可反映MEM工艺的迅速发展过程。Stratsys公司凭借其FDM系列设备，其市场占有率迅速上升，并在2003年取代曾经在RP设备供应商中长期占据主导地位的美国3D Systems公司（经营SLA设备为主），成为全球销售RP设备最多的公司（Stratasys 3 013台，3D System 2 898台）。熔融挤出快速成形技术之所以能被广泛认同并获得迅速发展，主要因为它具有以下特点。

1）成形材料广泛　一般的热塑性材料如塑料、蜡、尼龙、橡胶等，作适当改性后都可用于熔融挤出堆积成形。目前已经成功应用于MEM工艺的材料有：蜡、ABS、PC、ABS/PC合金以及PPSF等。其中ABS工程塑料是目前MEM工艺中应用最广泛的成形材料，也是成形工艺中最成熟、最稳定的一类成形材料。即使同一种材料也可以作出不同的颜色和透明度，从而制出彩色零件。该工艺也可以堆积复合材料零件，如把低熔点的蜡或塑料熔融时与高熔点的金属粉末、陶瓷粉末、玻璃纤维、碳纤维等混合作为多相成形材料。

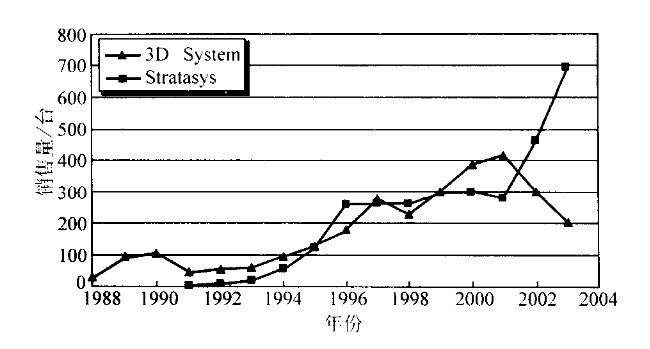


图6.7-2 Stratasys公司熔融挤出设备销售曲线

MEM工艺成形时需要支撑结构，支撑材料可与成形材料异类异种或者是同种材料。随着可溶解性支撑材料的引入，使得MEM工艺支撑结构去除的难度大大降低。

2）成形零件具有优良的综合性能　MEM工艺成形ABS、PC等常用工程塑料的技术已经成熟，经检测使用ABS材料成形的零件，零件力学性能可达到注塑模具零件的60%～80%。使用PC材料制作的零件，其机械强度、硬度等指标已经达到或超过注塑模具生产的ABS零件的水平。因此可用MEM工艺直接制造可满足实际使用要求的功能零件。

此外MEM工艺制作的零件在尺寸稳定性、对湿度等环境的适应能力上要远远超过SL、LOM等其他成形工艺成形的零件。

3）较高的成形精度　目前，MEM工艺最高精度已达0.12 mm/100 mm，使用标准零件测得的平均变形（包括Z向）可达到0.37%。其变形控制精度已接近或者超过激光立体光刻的普通水平。

4）成形设备简单、成本低廉，可靠性高　熔融挤出堆积成形是靠材料熔融实现连接成形。由于不使用激光器及其电源，大大简化了设备，使之尺寸减小、成本降低。一台熔融挤出堆积成形设备一般为几万到十几万美元，而其他快速成形设备一般要十几万至几十万美元。熔融堆积成形设备运行、维护也十分容易，工作可靠。

5）成形过程对环境无污染　熔融堆积成形所用材料一般为无毒、无味的热塑性材料，因此对周围环境不会造成污染。设备运行时噪声很低，适合于办公应用。

6）容易制成桌面化和工业化快速成形系统　桌面制造系统是快速成形领域产品开发的一个热点，快速成形系统作为三维CAD系统输出外设而广泛被人们接受。由于是在办公室环境中使用，因此要求桌面制造系统体积小，操作、维护简单，噪声、污染少，且成形速度快，但精度要求适当降低。根据以上分析，熔融挤出快速成形恰好能满足这些要求，如Stratasys公司推出的Genisys 3D Printer和FDM——Demension，据报道它进入市场仅几个月，已显示出桌面制造系

统巨大的市场潜力，特别是后者，最近两年每年销售量达500台以上。它已像打印机一样占据设计室的一席之地，完成设计的三维打印，帮助设计者进行设计验证，快速开发产品。实践证明熔融挤出快速成形工艺是实现桌面化快速成形的最佳工艺之一。

与此同时，它同样适合于发展成制作大型零件的工业化快速成形系统。对工业化快速成形系统的主要要求是成形零件尺寸较大，精度和强度都较高，速度较快，可满足一般应用需要。比如，如 Stratasys 公司最近推出的 FDM8000 和 Quantum，以及北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司推出的 MEM600－I 型等大型 MEM 成形设备，其最大成形尺寸达 457 mm × 457 mm × 609 mm、600 mm × 500 mm × 600 mm 以及 500 mm × 500 mm × 600 mm，受到工业界欢迎。

2 熔融挤出成形系统的构成

熔融挤出成形系统同其他快速成形系统类似，是一个典型的机械电子系统，根据系统分析的观点可以将它分为数据处理、控制驱动以及机构本体三个子系统。

2.1 系统构成

1）数据处理系统　对于 MEM 工艺而言，每一层扫描路径信息可分为轮廓、网格以及支撑三部分。因此数据处理系统需要对输入的 STL 文件进行数据检验、修正、添加支撑、进行网格填充的处理并分层形成层片文件。

2）控制驱动系统　读入零件的分层文件，根据工艺参数要求产生控制指令和扫描运动指令，在指令的控制下驱动系统驱动喷头和运动机构完成规定的操作。

3）机构本体系统　是工艺过程的执行机构，为系统提供可控的成形环境和实现扫描与材料堆积的基本结构，并在控制信息作用下，完成总功能要求的动作，实现材料的有序转移。在 MEM 系统中机构本体需要完成的基本功能有：实现材料的连续挤出以及实现喷头与成形底板之间的 X、Y、Z 三维扫描运动以及对成形环境（主要是温度环境）进行有效控制。依据功能分解原则，MEM 成形系统的机构本体部分可分解为扫描系统、熔融挤出系统（喷头模块）以及温控系统三部分。

MEM 的硬件系统分解图如图 6.7-3 所示。

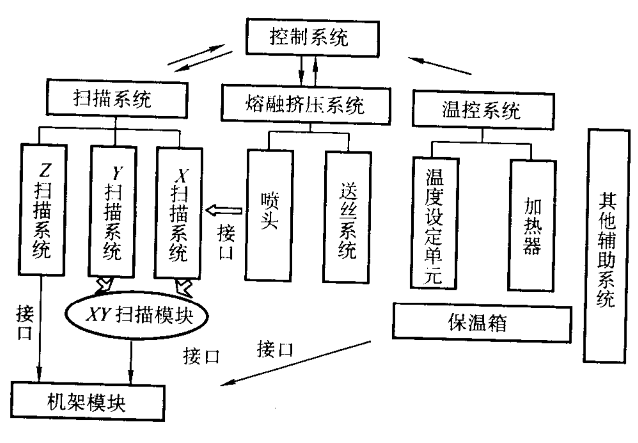


图 6.7-3　MEM 硬件系统分解图

2.2 喷头系统概述

喷头是实现熔融挤出快速成形的关键部件，是实现材料堆积成形的前提和核心，喷头结构设计和控制方法是否合理，直接关系到成形过程能否顺利进行，并影响成形件的质量，是整个 MEM 系统的一个重要子系统。喷头的基本功能就是导入成形丝材，将其充分熔化，并以极细丝状从喷嘴挤出。从功能上讲，喷头系统包括两个基本部分，一是送丝驱动部分，二是液化器和喷嘴部分。在 MEM 工艺中，理想的喷头应该满足以下几点要求。

1）材料能够在恒温下连续稳定地挤出　这是熔融堆积成形对材料挤出过程的最基本的要求。恒温是为了保证粘接质量，连续是指材料的输入和输出在路径扫描期间是不间断的，这样可以简化控制和降低装置的复杂程度。稳定包括挤出量稳定和挤出材料的几何尺寸稳定两方面，目的都是为了保证成形精度和质量。本项要求最终体现在熔融的材料能无堵地挤出。

2）材料挤出具有良好的开关响应特性以保证成形精度　熔融堆积成形是由 X 和 Y 轴的扫描运动、Z 工作平台的升降运动以及材料挤出相配合而完成。由于扫描运动不可避免地有启停过程，因此需要材料挤出也应该具有良好的启停特性，换言之就是开关响应特性。启停特性越好，材料输出精度越高，成形精度也就越高。

3）材料挤出速度具有良好的实时调节响应特性　MEM 工艺对材料挤出系统的基本条件之一就是要求材料挤出运动能够同喷头 XY 扫描运动实时匹配。在扫描运动起始与停止的加减速段、直线扫描、曲线扫描对材料的挤出速度要求各不相同，扫描运动的多变性要求喷头能够根据扫描运动的变化情况适时、精确的调节材料的挤出速度。另外对于采用自适应分层以及曲面分层技术的成形过程中，对材料输出的实时控制要求则更为苛刻。

4）挤出装置的体积和重量需限制在一定的范围内　目前成功应用的 MEM 成形系统中，全部是采用 XY 扫描系统带动喷头进行扫描运动的方式来实现材料 XY 方向的堆积。喷头系统是 XY 扫描系统的主要载荷。喷头系统体积小可以减小成形空间，重量轻可以减小运动惯性并降低对运动系统的要求，也是实现高速（高速度和高加速度）扫描的前提。

5）足够的挤出能力　提高成形效率是人们不断改进快速成形系统的原动力之一。在 MEM 工艺中，实现材料的高速、连续挤出是提高成形效率的基本前提。目前开发成功的 MEM系统中，其最大扫描速度可达 180 mm/s，因此要求喷头必须有足够的挤出能力来满足高速扫描的需要。实际上高精度直线运动系列的运动速度可以轻松达到 200 ~ 500 mm/s，但在 MEM 工艺中材料挤出速度是制约熔融堆积成形速度不断提高的瓶颈之一。

在熔融挤出快速成形工艺中，材料挤出可以有不同的挤压方式。也就是说，材料送进可以有多种不同方式，如丝材送进泵送和活塞送进（如图 6.7-4 所示）。图 6.7-4a 所示为丝材送进挤压方式，成形材料为丝状热塑性材料，经驱动机构送入液化器，并在其中受热逐渐熔化，先进入液化器的材料熔化后受到后部未熔材料丝（起到推压活塞的作用）的推压而挤出喷嘴。图 6.7-4b 所示为螺旋泵送进挤压方式，采用一螺旋泵实现颗粒状原材料的泵送、加热和挤出，挤出材料的速度可以由螺杆的转速调节。图 6.7-4c 所示为活塞缸送进挤压方式，喷头的主要部分是一缸体，成形材料在缸内受热熔融，在活塞的压力作用下挤出喷嘴。可以看出，这几种方式都能实现材料的送进、熔融和挤压。在目前成熟的 MEM 系统中，喷头采用的挤出形式几乎全部为丝材送进挤压方式和螺杆挤压式喷头。其中丝材送进挤压式喷头以美国 Stratasys公司设计的喷头和清华大学激光快速成形中心早期开发的喷头为代表。螺杆挤压式为清华大学激光快速成形中心的产品，主要应用在北京殷华快速模具以及快速成形技术公司开发的系列 MEM 设备中。

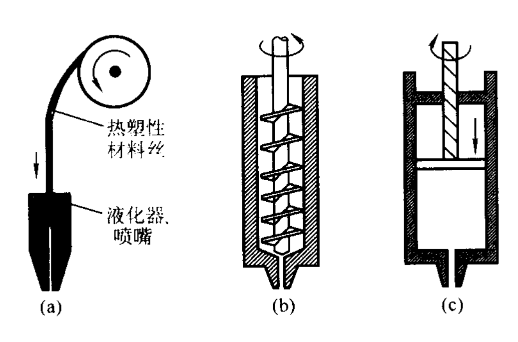


图 6.7-4 MEM 工艺的材料不同送进方式

2.3 丝材挤压喷头系统

(1) 喷头结构 丝材挤压喷头系统是由送丝电机、驱动轮、液化器（管）、喷嘴等组成，结构简图如图 6.7-5 所示。材料丝在驱动轮作用下被送入液化器（管）中，并在其中受热而逐渐熔融成为液体。由于送丝运动的连续性，先进入液化器中已被熔化的材料在液化管入口部的未熔材料丝的推压下从喷嘴喷出，完成出丝动作。可见，在丝材挤压喷头中，送丝电机以及驱动轮提供挤出动力，液化器入口处的未熔材料丝起到活塞的作用。

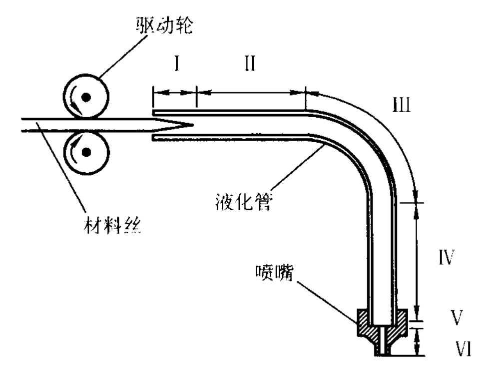


图 6.7-5 材料堆积单元工作原理

MEM 工艺中，理想情况下喷头下根据控制信号的要求实现材料的瞬时挤出和关断。而实际上由于材料黏弹性的原因，当液化管一端的材料获得运动速度后，另一端则要落后一段时间才能获得相应的运动，从而导致出丝运动对驱动信号的响应滞后。在实际喷头出丝过程中，出丝运动对于控制信号的响应可分为三个阶段（图 6.7-6）。

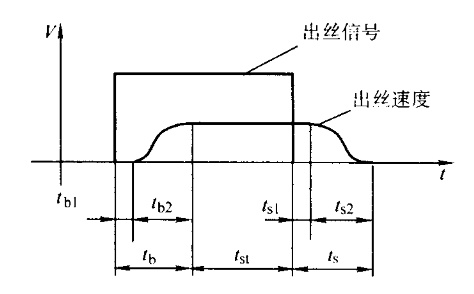


图 6.7-6 材料流动的三个阶段

1）出丝暂态流动阶段 t_b，是指从出丝信号发出到喷嘴口材料进入稳定流动的阶段。该阶段由出丝滞后段 t_{b1} 和出丝过渡段 t_{b2} 组成。

2）出丝稳态流动阶段 t_{st}，是指喷嘴内材料处于稳定流动的阶段。

3）停丝暂态流动阶段 t_s，是指从停丝信号发出到喷嘴口材料完全停止流动的阶段。该阶段由停丝滞后段 t_{s1} 和停丝过渡段 t_{s2} 组成。

在实际造型工艺中，为了实现喷头出丝运动与扫描运动的实时匹配，一般采用提前开启喷头、延时关闭等措施来消除喷头对控制信号响应滞后所带来的不利影响。

(2) 喷头送丝系统设计原则

送丝系统不仅要实现从储料箱丝轮上抽取丝状材料的动作，更要为材料的挤出提供动力。因此，送丝系统的工作稳定性、最大推力等因素直接影响到喷头挤出动作。送丝系统需要实现的目标是向喷头液化器连续、可靠地送进材料，并提供稳定的压力。

送丝系统一般都采用摩擦轮送进的方式提供动力。只要将丝材的形状误差以及材料的性质控制在一定范围内，摩擦轮就能够提供稳定可靠的推进力。实际上，送料系统需要解决的最大问题是喷头堵塞，即材料送进堵塞。发生堵塞的主要原因是在丝材推压液化管中液体时，丝材承受压应力超过临界值，出现失稳，即发生堵丝现象（如图 6.7-7a）。这段材料丝的受力状态可以用一端为固定端，而另一端为铰支的杆压缩问题来近似处理。对于材料丝与驱动轮的接合处，由于是很小的面接触，所以可以作铰支处理（如图 6.7-7b 所示）。

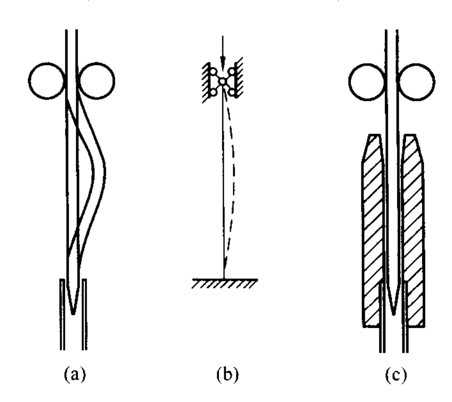


图 6.7-7 堵丝问题示意图

根据计算失稳的欧拉公式，成形过程中不出现堵丝时材料丝所能承受的临界压力为

$$F_c \approx \frac{\pi^2 EI}{(0.7L_0)^2} \tag{6.7-1}$$

式中，L_0 为材料丝在驱动轮与液化管入口间的长度；E 和 I 分别为材料丝的弹性模量和截面惯性矩。

$$I = \frac{\pi d_L^4}{64} \tag{6.7-2}$$

由于材料丝直径和液化管内径几乎相等，所以材料丝的直径取为液化管的内径 d_L。

由式（6.7-1）可以看出，成形过程中要防止堵丝应采取以下措施。

1）结构措施

① 在喷头结构尺寸允许的情况下，应尽量减小受压段材料丝的长度，即驱动轮和液化管入口之间的距离应尽量缩短。

② 对受压段材料丝增加辅助支撑，例如在液化管端部增置特氟龙导入套，由于特氟龙材料的摩擦阻力极小，导入套对材料丝的摩擦阻力可以忽略。辅助支撑的增加相当于减小了材料丝受压段的长度。

③ 对材料丝的驱动应采用双轮驱动，如果采用一主一从的驱动方式，由材料丝与驱动轮间的受力分析可见，二驱动轮间的材料丝将受到一偏转力矩的作用，特别容易发生堵丝。双轮驱动可使材料丝受力均衡。

2）其他措施



① 喷头是工作于加热的成形环境之中，同时液化管的加热元件也释放热量，因此材料丝在进入液化管之前就已经因受热而温度升高，使材料的弹性模量降低，从而导致材料的失稳压力下降，从而易出现堵丝。使用蜡丝作成形材料时，在55℃附近就会出现软化现象，而成形环境温度一般为40～50℃，这样蜡丝在送进时无法实施推压作用，因此在喷头中必须通以冷风，使材料丝在进入喷嘴前一直处于较低温度（10～20℃），以提高它的抗失稳能力。在使用ABS丝作为成形材料时，因ABS材料的软化点为250～300℃，环境温度对ABS丝的抗压极限影响极小，所以喷头中可以不通冷风。

② 减少材料丝所受的压力，材料丝的受力主要是液化管中液体材料的流动阻力造成的，在保证成形材料在液化管中不致受热分解和流出喷嘴后具有良好成形性能的前提下，应尽量提高材料在液化管中的温度，以降低其黏度，减少流动阻力。特别是在液化管中的固液共存段，液化管要保证足够的加热功率，使材料丝进入液化管后尽快熔化，以减少固液共存段的长度。

（3）液化器设计

液化器在喷头中实现成形材料丝由固态向液态的转变，为了达到精确控制出丝的目的，要求液化管内材料的温度均匀一致，其温度能够精确控制。

1）液化器的结构设计　液化器的基本结构如图6.7-8a所示，芯部为液化管（一薄壁铜管），其外部设有多层加热元件，最外层为绝热层，以防止热量的散失。材料丝在液化管中受热熔融。由于采用适当的加热元件，使得调整液化管的温度分布变得十分容易。

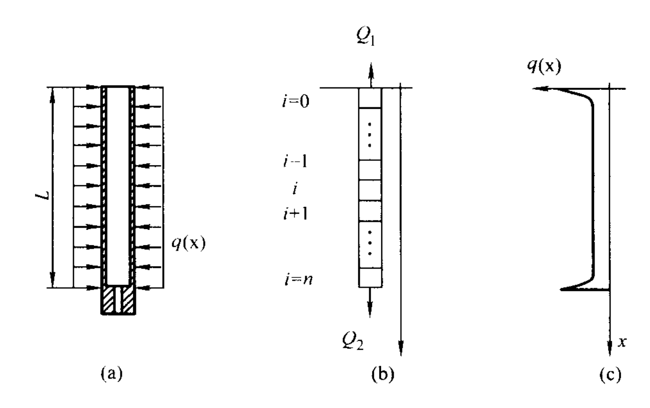


图6.7-8　液化器结构示意图

2）加热元件的分布设计　对于发热元件沿液化管均匀分布的液化器，经实验测试，发现液化管的温度分布呈抛物线状，中间温度较高，两端温度较低，当喷嘴温度为75℃时，最大温差竟达25℃。由于液化管温度的不均匀性，导致其中的材料状态变化较大，增加了材料流动的控制难度。因此，液化器在设计中应保证液化管温度分布的均匀性。

① 液化器的传热分析　根据液化器的结构和安装方式，其物理模型可简化为：液化管的上端部为接触散热，下端部为对流散热，忽略液化管绝热层的散热（如图6.7-8b），因此其传热控制方程为

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} A + q(x) = \rho c A \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} \tag{6.7-3}$$

边界条件为

$$x = 0, \lambda A \frac{\partial T}{\partial x} = Q_0 \tag{6.7-4}$$

$$x = L, -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} = Q_1 \tag{6.7-5}$$

初始条件为

$$T(x) = TE \tag{6.7-6}$$

其中，λ、c 和 ρ 分别为液化管材料的热导率、比热容和密度，$T(x)$ 和 $q(x)$ 分别为液化管的温度分布和发热元件的热流量分布，L 和 A 分别为液化管的长度和截面积。Q_0、Q_1 为液化管上部和下部的散热量。

如果将液化管在长度方向上离散为 n 等份（如图6.7-8b），则上述微分方程可转化为如下差分方程的形式

$$q_i \Delta x + \frac{A}{R}(T_{i-1}^0 - T_i^0) + \frac{A}{R}(T_{i+1}^0 - T_i^0) = \frac{\rho c \Delta V}{\Delta t}(T_i^1 - T_i^0) \tag{6.7-7}$$

边界条件

$$i = 0, q_0 \Delta x + \frac{A}{R}(T_1^0 - T_0^0) = \frac{\rho c \Delta V}{\Delta t}(T_0^1 - T_0^0) \tag{6.7-8}$$

$$i = n, q_n \Delta x + \frac{A}{R}(T_{n-1}^0 - T_n^0) = \frac{\rho c \Delta V}{\Delta t}(T_n^1 - T_n^0) \tag{6.7-9}$$

式中，Δx 和 ΔV 分别为离散单元的长度和体积，R 为单元间的热阻，T_i^0 和 T_i^1 分别为离散单元当前时刻和下一时刻的温度，Δt 为时间步长。

由此可见，实现液化管温度均匀分布的唯一解为

$$q_i = \begin{cases} \frac{\rho c A}{\Delta t}(T^1 - T^0) + \frac{Q_0}{\Delta x} & (i = 0) \\ \frac{\rho c A}{\Delta t}(T^1 - T^0) & (i = 0, \cdots, n-1) \\ \frac{\rho c A}{\Delta t}(T^1 - T^0) + \frac{Q_1}{\Delta x} & (i = n) \end{cases} \tag{6.7-10}$$

② 液化管温度均布的措施

a）减小端部散热　由式（6.7-10）可以看出，导致液化管温度分布不均匀的根本原因是其两端的散热 Q_0 和 Q_1。如果 Q_0 和 Q_1 为零，当 $q(x)$ 为常数，也就是加热元件均匀地安装在液化管上时就可保证液化管温度均匀分布。为此在开发MEM－250成形机的液化器时，对两固定端采取了一系列隔热措施，使端部散热量降低到最小。

b）调整加热元件分布　尽管对液化器两固定端采取了绝热措施，但散热是无法杜绝的。以上的传热分析为确定液化管加热元件的分布提供了指导，由于传热边界条件无法准确测定，所以实现液化管温度均匀的加热元件分布规律还要靠实验最终确定。以式（6.7-10）为依据，以图（6.7-8c）所示的曲线作为加热元件的分布，经反复试验最终液化管的温度变化范围控制在2℃以内。

③ 液化器温度控制　为保证熔融材料挤出喷嘴后具有较好的成形性，液化管的温度要严格控制。MEM－250的液化管加热控制系统由温度控制器、传感器和加热元件组成，工作原理如图6.7-9所示。测温传感器固定于液化管的下部圆盘上。

温度控制器采用英国 West Instruments Ltd. 的 WEST－8100型智能温度控制器，它功能齐全，具有温度显示，热电耦、热电阻及变送器输入，电压及直流输出功能PID自整定功能，通过RS－485串口可以与上位机通信。

2.4　螺旋挤压喷头系统

螺杆挤压式喷头由清华大学激光快速成形中心开发，主要应用于北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司开发的系列产品中。螺杆挤压式采用螺杆挤出技术，利用螺杆旋转产生压力挤出材料。螺杆挤压喷头使用送丝摩擦轮的方式将成形材料送至液化器中螺杆螺纹段。随着螺杆的旋转，材料不断被泵进到液化器深处并逐渐融化最终通过喷嘴挤出。

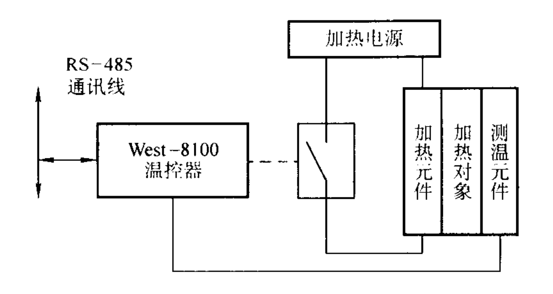


图 6.7-9 加热控制系统原理图

螺杆挤压喷头和丝材挤压喷头相比，具有如下优点。

1）挤出能力强，适用材料广泛　采用螺杆产生的推进动力，材料只是被动挤出，因此对材料抗压性能以及成形材料丝材直径等没有特殊。而丝材挤压喷头需要材料本身主动参与挤出运动，提供活塞功能，因此对成形材料丝材抗压能力以及丝材直径精度要求较为苛刻。

2）送料方式灵活多样　在螺杆挤压式喷头中送料机构只须将材料送至液化器中螺杆螺纹段即可，对材料形状、送料机构无其他特殊要求。实际上螺旋挤压在螺旋根部进料段的压力很小，材料送进阻力很小，送料很容易实现。目前清华大学已经为螺杆挤压喷头开发了颗粒送料系统以及粉末送料系统，即喷头可直接使用粒状材料或者粉末材料进行成形，从而省却材料拉丝制备过程。

3）材料挤出效率高　目前螺杆挤压式喷头最大的材料挤出速度可达 180 g/h（挤出材料为 ABS），远远高于丝材挤压喷头。

4）响应速度快　螺杆挤出建立了除喷嘴外的整个熔融体的同时位移，最大可能地消除了物料粘弹性的影响，变压力控制为位移控制，实现了快速响应和挤出速度的实时调节。

5）流涎少　在接近喷嘴处均为狭窄的缝隙，减小了喷嘴的熔腔体积；并且在螺杆长度方向上压力是逐步建立的，在喷嘴处压力最高，而喷嘴的容积很小，因此从根本上改善了流涎状况。

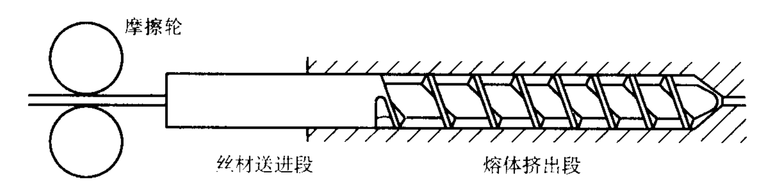


图 6.7-10 螺旋挤压喷头示意图

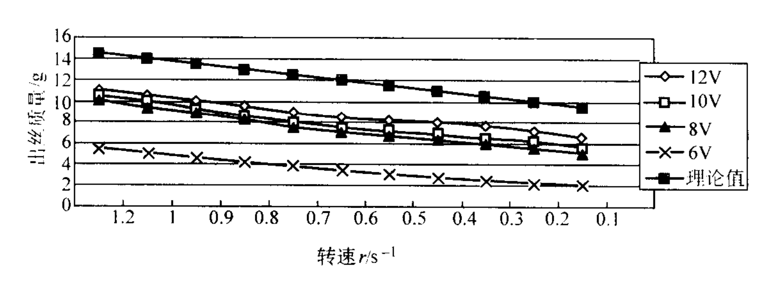


图 6.7-11 螺杆挤压喷头材料挤出速度曲线

图 6.7-11 为清华大学开发的螺杆挤压喷头材料挤出速度实测曲线。采用的送丝方式为直流电机带动摩擦轮送进，通过调整送丝电机电压调节材料送进速度。成形材料为直径 1.8 mm丝状 ABS 材料。材料沉积时间为 3 min。从图中可以看出，喷头的挤出速度基本与螺杆转速基本呈线性，螺杆转速越快，材料挤出速度越大。同时发现送丝速度越快，材料挤出速度也越大。可见该喷头具有较大的挤出潜力，材料送进速度成为制约喷头发挥最大挤出能力的瓶颈。但实际上，当送丝电压达到 8 V时，材料的挤出速度足以满足180 mm/s 高速扫描的需要。

2.5 喷头可靠性

喷头中的部件主要可以分为动力机构、机械传动机构、螺杆挤压筒机构、喷嘴、测温传感器和加热装置等几个部分。实际上目前动力机构（步进电机）和机械传动机构的设计加工水平已经非常成熟，其工作寿命可以达到 10^5 h，在实际应用过程中这两部分很少出现故障，在此不再讨论。在实际型过程中，导致喷头失效的主要故障形式是喷嘴堵塞。

堵塞是指喷嘴处有异物，使熔融材料不能挤出或不能正常挤出。由于熔融挤出的喷嘴直径较小（一般为0.3～0.5 mm），所以容易发生堵塞。在实践中发现这是喷头最容易出现的故障之一。堵塞有两种情况，一是喷嘴中有不能熔融的硬度较高的异物，二是喷嘴受到了意外碰撞产生变形。第二种情况属于事故，这里不予讨论。

在第一种情况中，异物的来源途径有两种，一是材料中带有杂质。避免杂质应当在制备丝材时予以考虑，例如在螺杆挤出机模头处添加过滤网等。二是喷头中的材料在长时间加热后发生氧化分解，沉积出以碳或碳化物为主的杂质。螺旋挤压喷头可以产生比较大的挤出力，因此有可能将一部分杂质挤出喷头。在这方面讲，螺旋挤压喷头比直流道式喷头具有更高的可靠性。

在不能完全避免堵塞发生的情况下，就应当采取措施及时检测材料挤出情况。美国 Stratasys 公司的 FDM 系列采用扭矩传感器来测定摩擦轮的送丝力。当测定值超过设定的阈值后，系统即认为发生堵塞，并停机报警。在北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司开发的系列产品中，采用了测定送丝速度的方式，将测定的送丝速度和扫描速度匹配，当出现异常情况时即停机报警。这种方式的好处在于可以将传感器放置在从丝盘到喷头之间的任何位置而不必一定放置在喷头中，从而减轻了喷头的重量。由于传感器可以固定放置而不必随着喷头运动，因此也提高了传感器的可靠性。

另外一个问题是：发生堵塞后如何处理。理想的情况是立即停机并报警，待检修完毕后能够从停机点继续成形。北京殷华公司利用数控系统的实时中断功能，可实现上述要求。



螺杆挤压喷头的喷嘴常被设计成为一个独立可迅速更换的单元。当喷嘴发生堵塞故障时，可快速更换喷嘴恢复造型。

此外，温控失效也是 MEM 喷头比较容易发生的故障之一。造成温控失效的主要原因是传感器失效。针对这种情况，北京殷华公司应用了概率论中的多数原则法对温控系统进行了改进，有效避免了实际造型过程中喷头温控失效的产生。

3 熔融挤出成形过程的数值模拟

在 MEM 工艺成形过程中，成形材料存在一个从固态到液态，再到固态的相变过程。成形过程中，喷头挤出的液态材料丝被沉积在已经固化的材料表面，并逐渐固化、冷却。由于材料本身的热膨胀性能以及已固化材料对新沉积材料的约束，将会导致成形零件中存在一定的残余应力。当残余应力累计到一定程度后，将会导致成形零件发生翘曲、开裂等缺陷，从而严重影响成形质量。在实际成形过程中，成形零件发生翘曲、扭曲、开裂等变形是导致成形失败的最主要因素，因此有必要详细考察材料在成形过程中的变形行为。

影响材料热变形的因素相当多，包括各种工艺参数、材料性能参数、环境因素。这些因素中有的作用明显，有的不明显。如果采用反复实验的方法来优化这些参数是一件耗时、耗力的事情。采用有限元分析方法对 MEM 工艺过程进行分析，从而为优化工艺参数提供依据，是一种经济、快速的解决方法。

工艺过程的数值模拟，关键是要建立合理的模型。MEM 成形工艺，不同于以往传统的成形工艺，成形过程比较特殊，零件是逐步堆积而成，加工过程中的热现象也很复杂。在此，可利用非线性有限元软件 MARC 中热力耦合的热弹塑性分析方法对 MEM 工艺过程进行模拟。

3.1 MEM 工艺过程描述

熔融堆积成形过程是：熔流态的 ABS 丝从喷头挤出，沿着既定路径层层堆积起来。成形室的温度约为 80℃（此温度下，ABS 为玻璃态），而挤出的 ABS 丝温度大约为 220℃（此温度下，ABS 为熔流态），在ABS丝挤出、堆积、成形过程中要发生相变。这个工艺过程是不同于一般的热加工过程的，所要分析的对象尺寸不是固定的，而是随着加工过程的进行不断长大。MEM 过程中的热现象具有如下特点。

1）温度场的特点：温度变化范围大，温度场非稳态。

2）工艺过程中存在的传热方式

① 热传导　热传导是相互接触而温度不同的物体或物体中温度不同的各部分之间的热传递现象，热量从高温部分传给低温部分。这种方式表现为 MEM 工艺中后堆积上的部分与先前生成部分之间的传热。公式为

$$q = -\lambda \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x} \tag{6.7-11}$$

式中，λ 是热导率。

② 对流　工程上把具有相对位移的流体与相接触的固体壁面之间的热传递过程称为热对流。这种方式表现为零件与周围空气之间的传热。

零件被冷却时的公式为

$$q = \alpha(t_f - t_w) \tag{6.7-12}$$

式中，t_f 和 t_w 分别是零件和空气的温度。α 是对流换热系数。

③ 辐射　指物体通过电磁波来传递热量的方式。这种方式表现为零件在加工腔里与加工腔内壁之间的传热。式为

$$q = \sigma(T^4 - T_0^4) \tag{6.7-13}$$

式中，σ 为辐射系数。由于加工腔是恒温，这种传热方式可以忽略。

3）潜热　物体在极短的时间内发生相变所放出或吸收的大量热量即为潜热，相变引起的潜热在温度场求解中引入的潜热在温度场求解中引入了高度非线形的影响。

如相变起止温度范围为 $T_s \leqslant T \leqslant T_1$，则产生的潜热 Q_1 为

$$Q_1 = \rho C_1(T_1 - T_s) \tag{6.7-14}$$

式中，C_1 即为修正的比热容。

MEM 过程中从喷头挤出的 ABS 丝是熔流态，堆积冷却成玻璃态，有相变发生。所以在分析过程中，要考虑潜热的影响。

4）由于加工过程的不均匀加热和冷却，使得加工过程中存在应力，过程结束后，存在残余应力和变形。

3.2 材料特性

工艺过程的数值模拟，不仅要考虑实际的工艺过程，材料的特性也是很关键的问题。MEM 工艺采用的材料很多，有塑料、蜡丝等等。目前常用的是 ABS 树脂，其全名为丙烯晴-丁二烯-苯乙烯树脂，即英文 Acrylonitrile Butsdiene Styrene的缩写。A-代表丙烯晴，B-代表丁二烯，S-代表苯乙烯。由于 ABS 树脂是由三种单体共聚物聚合而成，故它能表现三种组分的协同性能：丙烯晴使聚合物耐化学腐蚀；丁二烯使聚合物呈橡胶状韧性；苯乙烯使聚合物具有刚性和流动性。总之，ABS 树脂具有耐热、表面硬度高、尺寸稳定，耐化学性及电性能良好，易于成形和机械加工等特点。

（1）ABS 树脂的性能

1）物理性能　大部分的 ABS 树脂是无毒的，不透水，但略透水蒸气，吸水率低，试样在室温下浸水一年吸水率不超过 1%，而物理性能不起变化。ABS 树脂制品的表面可以抛光，得到高度光泽的制品。

2）力学性能　大多数ABS树脂的抗拉强度为 35.2～47.2 MPa，特殊的品种可达 63.3 MPa。ABS 树脂的弹性模量为 1.41～2.81 GPa。屈服伸长率 2%～4%。

3）热性能　按不同的 ABS 树脂和所加的载荷，ABS 树脂的热变形温度从 65～124℃不等，其上限温度是耐热级和低负荷时的数值。通常的注塑级和挤出级的热变形温度约为 93℃。耐热级可达 115℃。ABS 的热稳定性差，在 250℃时将分解产生有毒的挥发性物质。按照熔融挤出快速成形工艺的要求，ABS 成形时的熔融温度应低于热分解温度，常用适宜熔融温度区间为 190℃～230℃，可满足成形工艺的要求。ABS 树脂在热塑性塑料中是线胀系数较小的一种，其值为 $7.2 \sim 9.5 \times 10^{-5}$ ℃。ABS 树脂的热导率为 $(5.05 \sim 7.52) \times 10^{-4} \times 419$ W/m·K。大多数 ABS 树脂在 −40℃时仍有相当的冲击强度，表现出韧性。因此一般的 ABS 树脂制品的使用温度从 −40～100℃。

（2）ABS 树脂的结构

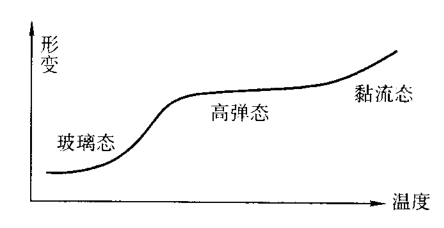


图 6.7-12　非晶态高聚物温度－形变曲线

ABS 属于无定形聚合物，具有优良的成形加工性。对于非晶态高聚物存在两个反映它微观运动特征的温度：黏流温度 T_f 和玻璃化温度 T_g。在不同温度范围内非晶态高聚物具

有玻璃态、高弹态、黏流态三种不同的聚集状态，如图 6.7-12 所示。

热塑性高聚物常在黏流态进行成形加工。比如：熔融挤出快速成形是在刚进入黏流态时的温度区间内进行成形。在黏流态，呈现液体的特征。黏流态的高聚物受外力作用会产生不可逆的形变，即去除外力后不会回复原状。黏流温度与熔融物的黏度是线型高聚物的黏流态的重要特性。熔体黏度对控制加工成形过程是很重要的。

聚合物和常用材料不同，它不是在特定温度，即熔点下表现从固体到液体的明显相变，而是在有限温度范围内经历熔融变化。在此范围以下，具有弹性固体的行为，表现出一些取决于时间性质的黏弹性。在熔融范围以上，熔融状的聚合物可视为高黏性流体，表现出一些弹性效应。

（3）ABS 树脂的热物理参数

ABS 树脂的热物理参数和力学参数随温度变化而变化。

在加工过程中，ABS 经历了从熔流态经高弹态到玻璃态的转变，软化点 105℃，热变形温度 88℃，忽略加工过程中的流体行为。

1）比热容 c（表 6.7-1）

表 6.7-1 ABS 液固态下的比热容

性质	液态比热容 c_m/J·$(g·K)^{-1}$	固态比热容 c_s/J·$(g·K)^{-1}$
ABS	2.052	1.675

比热容随温度变化的公式

$$c = a_1 + b_1 T \qquad (6.7\text{-}15)$$

2）热导率 K（表 6.7-2）

表 6.7-2 ABS 的热导率

性质	热导率 K_m/W·$(cm·K)^{-1}$	热导率 K_s/W·$(m·K)^{-1}$
ABS	2.788	0.67～3.60

热导率随温度变化的公式如下

$$K = a_2 + b_2 T \qquad (6.7\text{-}16)$$

3）熔融潜热 λ　ABS 的熔融潜热是 43.96 J/g。

（4）ABS 树脂的力学参数

1）弹性模量　ABS 丝由熔流态到玻璃态，弹性模量由小到大，取较大值 $E = 2\,500$ MPa。

2）初始屈服应力　MARC对热弹塑性描述采用Mises屈服准则。ABS树脂的屈服强度48 MPa，抗拉强度36 MPa。

3）泊松比　$\nu = 0.4$。

4）密度　$\rho = 1.05\ g/cm^3$。

5）线胀系数　$\alpha = 8 \times 10^{-5}$。

3.3 热力耦合问题的有限元分析理论

熔融堆积成形过程中存在着温度场和位移场两种量，要准确分析这些加工过程中的温度和应力变化通常不应把温度场的求解和应力场的分析分解开来。因为除了温度变化对结构变形和材料性质产生影响外，结构变形也会反过来改变热边界条件，进而影响温度的变化。即温度与位移两种不同场变量之间存在很强相互作用。由于温度和位移存在强耦合作用，如果先算温度，后分析热应力的解耦方法分析会产生较大误差。而按照热力耦合的分析方法，同时处理热传导和力平衡两类不同场方程，则比较精确。

在热力耦合分析中，变形和温度场的耦合计算采用的是弱耦合的模式，即在每一个增量步内的计算由两部分组成。第一部分为传热计算：结合变形功转化的热，潜热释放和传热边界条件进行温度场计算；第二部分为：结合温度变化引起的热变形以及温度变化引起的材料性能参数的变化，对熔融堆积成形过程进行弹塑性变形计算。

本文对熔融堆积成形过程采用了热力耦合的问题描述。MARC软件支持用总体拉格朗日方法、更新的拉格朗日方法或欧拉方法描述热弹性。本文采用更新的拉格朗日描述方法，给出与温度场耦合的大变形热弹塑性分析的增量有限元表示。

在构建热力耦合能量方程时忽略了惯性项的影响，并且假设物体 V 的能量方程和力平衡方程都是建立在当前的构型上。用弱耦合的能量非线性有限元法处理热力耦合问题。求解的方法是，在每个增量步开始时，由当前位移增量修正域 V 和边界 S，并且在增量步内交替迭代力平衡方程和能量方程。采用交替迭代方法求解更新拉格朗日描述的热力耦合方程的主要思路如下：在每个增量步开始时将几何形状更新，在新的拉格朗日坐标下分析温度场方程。采用非线性迭代解法求解热传导方程的等效温度场递推关系式。收敛后，在同一增量步中，更新温度值，评估材料力学性质和热应变，迭代求解力平衡方程；收敛后，进行下一增量步的分析直到所需得增量步结束。

3.4 物理模型的建立

实际的加工过程中有很多不确定因素，物理模型不可能完全模拟出实际情况；这里作了一些合理的假设，使得物理模型能描述出工艺过程中最主要的变化规律。建立的物理模型如下：

1）连续的挤出过程看成是一个个小六面体单元的堆积过程。

2）根据扫描速度，逐步激活单元；在每个时刻下，只对已激活的单元进行热力耦合分析。

3）热边界条件　激活每个单元的同时，给每个单元赋初始温度；已生成部分之间进行热传导；已生成部分与空气之间进行对流换热。

4）热初始条件　每个单元的初始温度为材料从喷嘴挤出时的温度。

5）加工过程 ABS 经历了三态变化，考虑材料参数随温度变化。

6）考虑材料的相变潜热。

7）底面约束采用完全约束。在加工方形件时会发生底层上翘的现象，合理选择约束条件在分析中是很关键的，否则会出现模拟的结果和实际不符的情况。一开始是将底层完全固定，实际加工中做不到这一点，但可以发现应力集中的分布情况和实际相符。

3.5 各因素对熔融堆积成形工艺成形质量的影响

MEM 工艺的加工特点是：在具有一定温度的成形室内，喷头挤出具有很高温度的 ABS 丝层层堆积在加工平板上。影响变形的因素很多，主要是环境因素、加工工艺参数和材料性能。其中环境因素包括：成形室温度、湿度等。成形室温度和湿度分布非均匀；加工工艺参数包括分层厚度、扫描路径、扫描速度、扫描间距等；材料性能包括热收缩等。

工艺实验中发现零件质量主要与成形室的温度、喷头温度、扫描速度有关。其他工艺参数虽然也很重要，但对于一个系统来说，分层厚度、扫描路径的规划等通常是固定不变的。材料的性能主要通过工艺实验来验证，也不作具体的分析合讨论。

因此，最终成形室温度、喷头温度、扫描速度、扫描路径作为重点对象进行分析研究。

（1）成形室温度

环境温度即指加工腔里的空气温度。加工腔里的温度分布不是均匀的，在靠近喷头的地方温度要高，其他地方的温度要低。加工中、大型零件时，这种温度分布的非均匀性对零件变形的影响比较小，因此研究过程中忽略这种非均匀性。

加工速度设为 20 mm/s，喷头温度设为 270℃，扫描路径设为奇数层沿 X 方向进行之字型扫描，偶数层沿 Y 方向进行之字型扫描。

计算结果显示：应力主要集中在底面，底面反作用力分布呈四周高，而中间低。这符合实际中零件边角翘曲现象。如图 6.7-13 和图 6.7-14 所示。

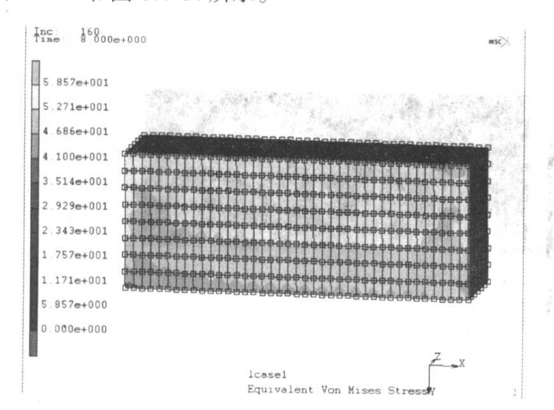


图 6.7-13　底面应力（Equivalent Von Mises Stress）分布图

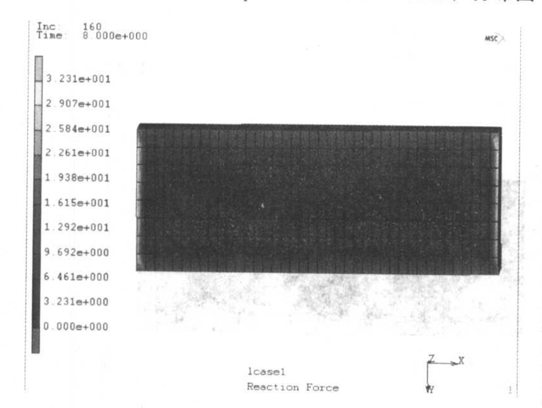


图 6.7-14　底面反作用力（Reaction Force）分布图

比较不同环境温度下底面的最大应力值（Equivalent Von Mises Stress）和最大反作用力值（reaction force）。环境温度 T 从 0℃变到 110℃。

表 6.7-3　不同环境温度下，原型件的最大应力值，最大位移和最大反作用力值

T/℃	0	10	20	30	40	50
应力/MPa	8.326	8.018	7.710	7.403	7.094	7.784
位移/mm	0.082	0.079	0.076	0.073	0.070	0.067
反作用力/N	0.459 3	0.442 3	0.425 3	0.408 3	0.391 2	0.374 2
T/℃	60	70	80	90	10	110
应力/MPa	7.476	7.165	5.857	5.549	7.231	4.933
位移/mm	0.064	0.061	0.058	0.055	0.052	0.049
反作用力/N	0.357 6	0.340 1	0.323 1	0.306 0	0.289 0	0.272 0

从表 6.7-3 可以看出：随着环境温度的升高，底面应力值和底面反作用力值也随之降低。当温度达到一定数值 T_0 之后，底面应力值和底面反作用力值趋于一定值。所以根据上述分析，若要降低原型件的应力值，减小变形，就要提高环境温度值。温度值略高于软化点温度为宜。若零件的整体温度达到软化点温度，零件就会出现坍塌现象。实验中所用 ABS 丝的软化点温度是 105℃。

工艺试验显示：环境温度低，原型件翘曲严重；环境温度过高，影响设备寿命。

所以在设备可以承受的范围内，环境温度越高越好；温度接近 105℃，但不能超过 105℃。但是对于小型件，环境温度分布的非均匀性对原型件的质量影响不可忽视，温度高，很容易导致原型件坍塌的现象。所以当加工小型原型件时，环境温度相对要设的低一些。

（2）扫描速度

在 MEM 工艺中，材料堆积的快慢或扫描速度的高低很大程度上取决于材料挤出速度。目前美国 Stratasys 公司 FDM－8000 型设备的材料挤出速度为 12～17 g/h，相当于 MEM 工艺中的扫描速度 20～30 mm/s。由于材料挤出速度慢，零件成形就很慢；这一点限制了 MEM 工艺的快速响应的优势。提高成形效率的手段之一即是提高扫描速度。清华大学激光快速成形中心的高速扫描喷头在保证正常挤出喷射的前提下，提高扫描速度达到 120 g/h。高速扫描给成形质量带来许多新的影响。通过有限元模拟的角度，比较不同扫描速度下零件的应力和变形，从理论上验证了高速扫描工艺方案的合理性和可行性。

针对 20×8×6 的方形件，单元 1×1×1，共 960 个单元。环境温度设为 80℃，喷头温度设为 220℃，扫描路径设为：奇数层沿 X 方向进行之字型扫描，偶数层沿 Y 方向进行之字型扫描。

单元激活时间分别为 0.05 s，0.005 s，0.003 s 和 0.001 s，分别代表扫描速度 20 mm/s，200 mm/s，333 mm/s 和 1 000 mm/s。20 mm/s 代表了目前 Stratasys 公司采用的扫描速度，200 mm/s 代表了设计目标，另外两个取值是为了检验高速扫描对内应力影响的变化趋势以及极限。

在 MEM 工艺中常发生翘曲变形，主要发生在底面角点处，该处内应力集中，所以主要分析底面，选定的关键参考点 S_1 在左小角。

1）温度与应力波动的对应关系　图 6.5-15 是单元激活时间为 0.05 s 时 S_1 点的温度——应力变化情况；上面的曲线为温度随时间变化的曲线，下面的曲线为应力随时间变化的曲线。

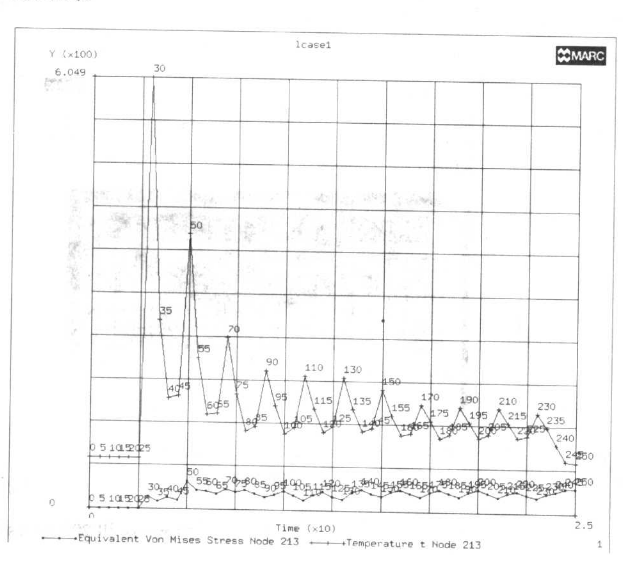


图 6.7-15　20 mm/s 时 S_1 点的温度－应力图

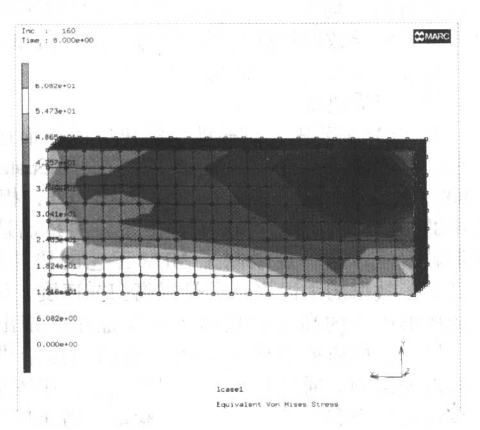
从图中可以看出，应力变化可以分为两个阶段。

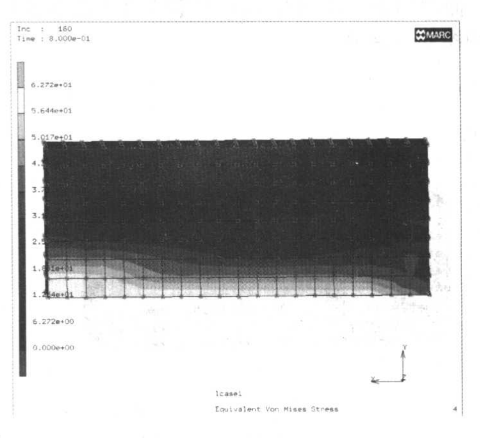
第一个阶段是开始的非稳态阶段。在该阶段应力变化比较剧烈，主要趋势是由低到高，和温度的分布没有完全的对应关系。

第二个阶段是到了 50 步后，应力变化趋于平稳，进入稳态阶段。该阶段应力和温度变化有明显的对应关系，当温度升高时应力降低。这和退火消除内应力的道理类似。

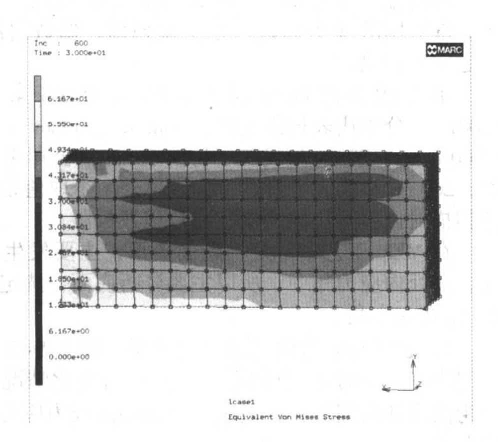
2）扫描速度与应力极值的对应关系（表 6.7-4）　不同扫描速度下，底面的应力分布有如下一些规律：角、点处的应力值较大；速度越高，底面的高应力区范围越小。

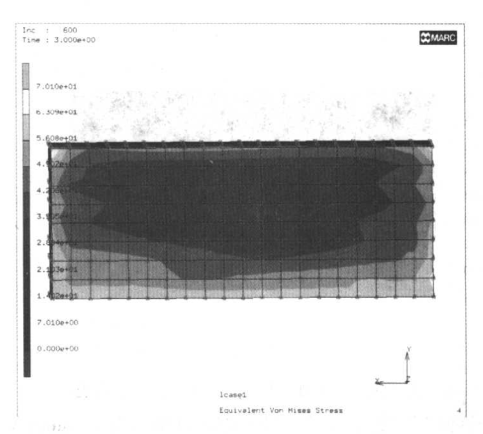
图 6.7-16 为 20 mm/s 和 200 mm/s 两种速度下底面的应力分布状况。图中左边为 20 mm/s，右边为 200 mm/s，颜色浅处应力高；颜色深处应力低。



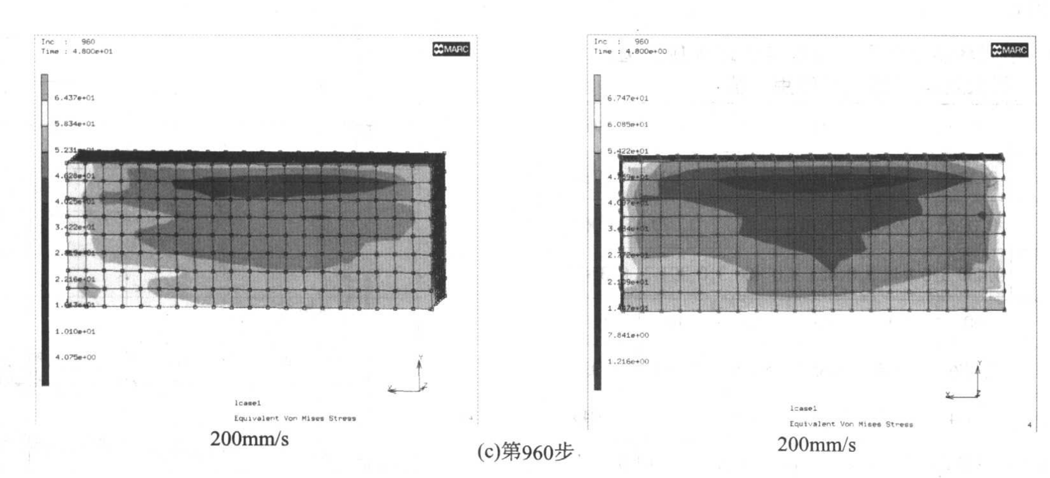


(a)第160步





(b)第600步



(c)第960步

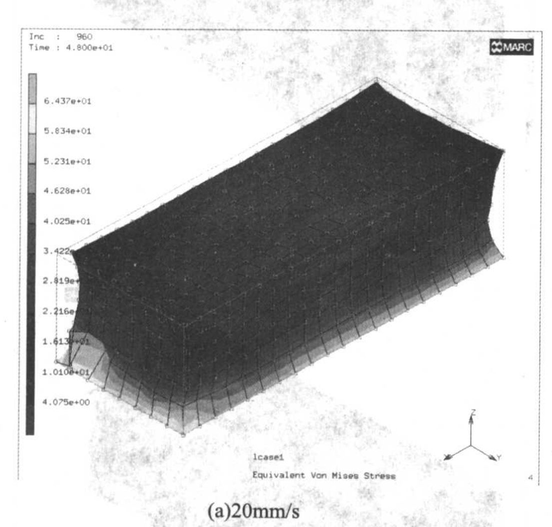
图 6.7-16　20 mm/s 和 200 mm/s 速度下长方体零件底面的应力分布情况



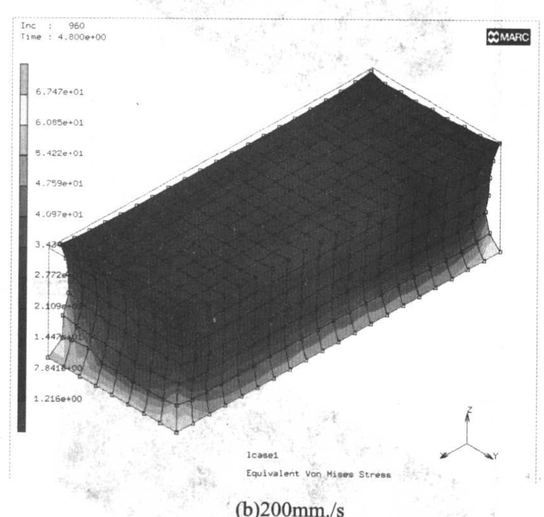
表 6.7-4　不同扫描速度下原型件的最大应力和最小应力

扫描速度/mm·s⁻¹	20	200
最大应力/MPa	7.437	7.447
最小应力/MPa	4.075	1.216

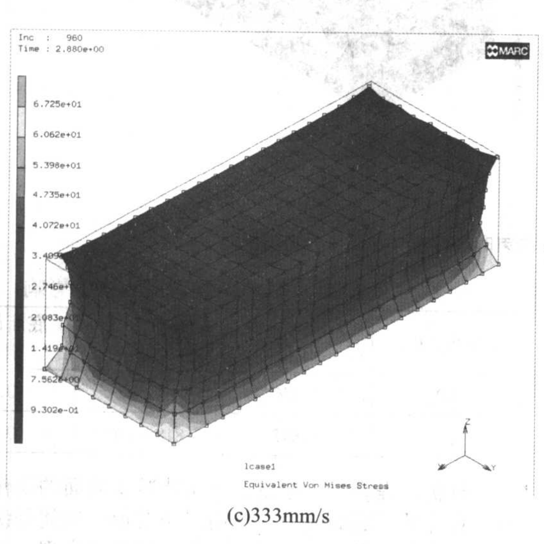
3）扫描速度与翘曲变形的关系　观察在不同成形速度下成形结束后试件的整体应力分布和变形情况。图 6.7-17 中变形量放大了 10 倍。沿长度方向变形最为明显，表 6.7-5 中最大变形即为该方向最大变形值。由于边界条件设计为底面完全固定，因此变形表现为侧壁的内凹。这一点和如下现象是吻合的：在成形过程中如果没有发生翘曲，则会经常出现侧壁内凹的变形。



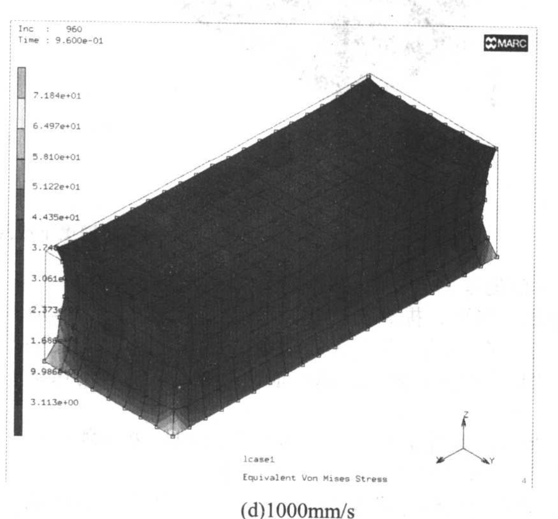
(a)20mm/s



(b)200mm./s



(c)333mm/s



(d)1000mm/s

图 6.7-17　试件整体应力分布及变形情况

从图 6.7-17 中可以看出变形量随着成形速度的提高而减小。例如试件左下角处，当堆积速度为 20 mm/s 时产生较强烈的变形，随着堆积速度的提高而逐渐缓和。

表 6.7-5　不同扫描速度下原型件的最大和最小应力值和最大变形值

扫描速度/mm·s⁻¹	20	200	333	1 000
最大应力/MPa	7.437	7.747	7.725	7.184
最小应力/MPa	4.075	1.216	0.932	3.113
最大变形/mm	0.227	0.147	0.100	0.082

4）扫描速度与整体温度分布的关系（表 6.7-6）

观察不同堆积速度下试件成形结束时的温度分布。

表 6.7-6　扫描速度和原型件整体最低温度的关系

扫描速度/mm·s⁻¹	20	200	333	1 000
最低温度/℃	76	90	98	122

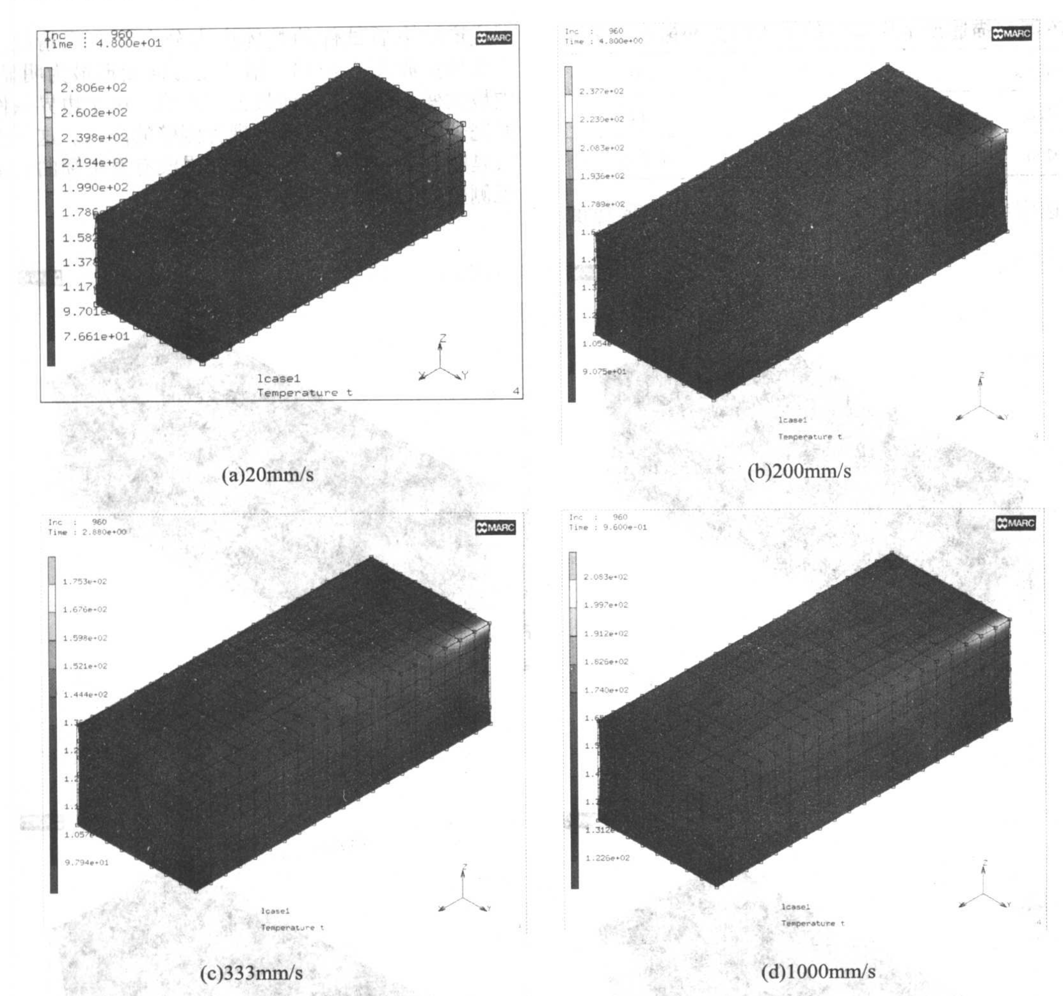
从图 6.7-18 中可以看到，当成形速度加大时，零件的整体温度上升，即形成高温堆积的情况。但是零件整体的温度不能高于材料的软化点。ABS 材料的软化点为 105℃左右。当扫描速度为 1 000 mm/s 时，试件实际已处于软化点之上，将有可能出现坍塌。

MEM 工艺中，当喷嘴直径为 0.5 mm 时，ABS 材料从 270℃冷却到 80℃的时间为 0.1 s，该时间即为相临层堆积的最短间隔时煎。在实际成形中零件尺寸一般都较大，并且完成一层的堆积后都有计算机的编译等待时间－因此一般都能满足最短间隔时间要求。

归纳起来：扫描速度越高，则零件的应力波动幅度小，次数少，零件的变形小。

为了验证不同加工速度对零件质量的影响，采用加工速度为 200 mm/s，以室温为造型环境温度，加工了一个长方形零件，零件质量完好，底面没有出现翘曲现象。

而同样试件，如果加工速度为 20 mm/s，仍以室温作为外



(a)20mm/s　　(b)200mm/s

(c)333mm/s　　(d)1000mm/s

图 6.7-18　在不同堆积速度下成形结束时零件整体的温度分布情况

部温度，得到的零件会翘曲。所以有如下结论。

1）堆积成形中，提高扫描速度降低了成形件的整体应力水平，减少了底面高应力区的范围，角点处应力增长平缓，应力波动次数少；因此高速扫描比低速扫描更容易保证成形质量。

2）清华大学快速成形中心开发的高速扫描喷头能很好的保证成形件的质量，有很好的应用前景。

3）扫描速度和环境温度的影响力比较　从上一节里的分析中可以得到，提高速度能降低应力水平。那么我们就想：如果为了降低应力水平，提高速度和提高环境温度，哪一个更有效？

比较方案 1：

加工 20 mm × 8 mm × 6 mm 的方形件，喷头温度为 270℃，环境温度为 60℃时，比较不同扫描速度对应力值等的影响，见表 6.2-7。

表 6.7-7　扫描速度对应力值等的影响

扫描速度 /mm·s^{-1}	底面最大应力值 /MPa	最大位移 /mm	底面最大反作用力 /N
20	7.476	7.43×10^{-2}	0.357 6
100	7.338	5.744×10^{-2}	0.348 1
200	5.989	5.104×10^{-2}	0.333 4

比较方案 2：

加工 20 mm × 8 mm × 6 mm 的方形件，加工速度为 20 mm/s，喷头温度为 270℃时，比较不同环境温度对应力值等的影响，见表 6.7-8。

表 6.7-8　环境温度对应力值的影响

温度/℃	底面最大应力值 /MPa	最大位移 /mm	底面最大反作用力/N
60	7.476	7.43×10^{-2}	0.357 6
80	5.857	5.818×10^{-2}	0.323 1

分析：提高加工速度，确实能减少底面的反作用力的大小，且降低了底面应力，从而减小变形；也就是说提高速度可以减少环境温度的影响。但是同时还会发现，速度的影响没有环境温度的影响来的大。

提高速度，可以减小变形，提高成形效率，但是会带来一系列工艺问题。诸如系统稳定性，材料粘结，等等。所以，如果为了减小变形，仅通过提高加工速度不是最优的选择。

4）喷头温度　ABS 丝的熔流态温度 T_f 是 180℃，当材料温度达到 300℃时，材料就会氧化，所以我们分析比较的喷头温度范围是在 180℃ ~ 300℃。环境温度 80℃，加工速度为 20 mm/s。见表 6.7-9。

表 6.7-9　喷头温度对原型件的应力值等的影响

喷头温度 /℃	底面最大应力 /MPa	最大位移 /mm	底面最大反作用力/N
300	7.782	7.738×10^{-2}	0.374 1
270	5.857	5.818×10^{-2}	0.323 1
240	4.932	4.898×10^{-2}	0.272 0



续表 6.7-9

喷头温度/℃	底面最大应力/MPa	最大位移/mm	底面最大反作用力/N
210	4.004	3.97×10^{-2}	0.221 1
190	3.387	3.352×10^{-2}	0.187 1
180	3.078	3.04×10^{-2}	0.170 0

分析：喷头温度降低有利于减少变形，但是，喷头温度过低，材料流动性不好。所以：为了保证材料的流动性和粘接性，同时保证零件质量，喷头温度在 190～210℃之间比较合理，而且温度低一些好。

5）扫描路径（即区域填充方式）

① 区域扫描填充　对 MEM 来说，区域扫描填充是指：通过直接添加实体内部材料成形，扫描填充模型实体内部的区域。进行区域扫描填充要根据工艺的特点，综合考虑成形时间、成形强度、表面粗糙度等因素，从以下三个方面进行扫描填充的设计：扫描填充方式、扫描填充密度和不同层片的不同填充处理。

（i）扫描填充方式　区域扫描填充方式有很多种，如单向栅线扫描（图 6.7-19a）、分区域栅线扫描（图 6.7-19b）、垂直交叉栅线扫描（图 6.7-19c、d）、斜交叉栅线扫描（图 6.7-19e）、螺旋形扫描（图 6.7-19f）、偏置扫描（图 6.7-19g）等。在以上扫描方式中，最常用的是各种栅线扫描和偏置扫描。

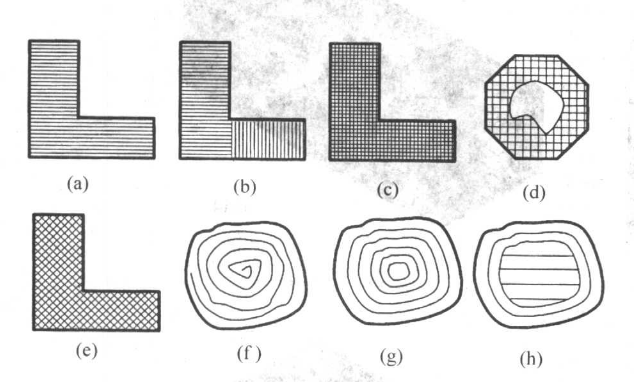


图 6.7-19　各种区域扫描方式

栅线扫描的优点是：

i）扫描线规划技术相对简单；

ii）对于任意复杂区域，通过调整栅线间距，均可致密填充；

iii）可以采用比较高的扫描速度。

栅线扫描在某些情况下，会产生以下缺点：

i）单向栅线扫描实体内部区域时，各栅线之间连接强度较低，导致成形件内部组织具有各向异性的特点；

ii）在扫描起停响应性能和扫描开断响应性能不好的情况下，影响成形精度。在栅线扫描与表面轮廓的交点处，对于 MEM 工艺，易造成材料的过堆积，形成“节瘤”现象。

偏置扫描从原始轮廓开始，采用顺序偏移的方式生成连续的扫描线，避免了区域内部扫描线与轮廓扫描线的相交，提高了成形件的表面精度。另外，偏置扫描减少了扫描启停和开关次数，成形的速度也比较快。

如果灵活组合，可以用偏置扫描和栅线扫描在较高的成形速度下，获得比较好的成形质量。对于 MEM 工艺，可以通过组合偏置扫描和栅线扫描实现壳型制造。从层片轮廓开始，向区域内部先偏置 3 到 4 次，然后用稀疏的栅线扫描填充其余部分，如图 6.7-19h 所示。

（ii）扫描填充密度　对于 MEM 工艺，随着扫描填充密度的增大，成形强度增大，但同时成形时间也随之增加。一般来说，光栅间距越小，无用材料的去除越容易，防止零件温度应力和层间粘接不良导致的裂缝的传播效果也越好，从而对提高成形精度作用也越大。但另一方面，加工的时间也随之延长。

（iii）不同层片的不同填充处理　MEM 工艺由于材料不能在同一点处堆积两次，在同一层只能采用单向栅线扫描。为了避免各向异性造成成形件在垂直于扫描方向上的低强度，可以采用相邻层 *XY* 垂直交叉扫描的方式（图 6.7-20a）。在一般层片，填充线间距约等于两倍的材料丝直径以提高成形速度，但对于成形件表面平行于分层方向的平面来说，采用较大的间距无疑将严重影响表面质量。此时将间距取为稍大于丝直径即可，以获得较为致密的外表面（图 6.7-20b）。

② 扫描路径顺序的规划　扫描路径顺序的规划对成形时间和成形件表面粗糙度均有较大影响。按照一定的填充方式生成区域扫描线段后，要按照一定的顺序将这些扫描线段连接成连续的扫描路径。连接这些扫描线段的线段在数控加工中对应于空程行走，一般采用快速行进的指令来实现。

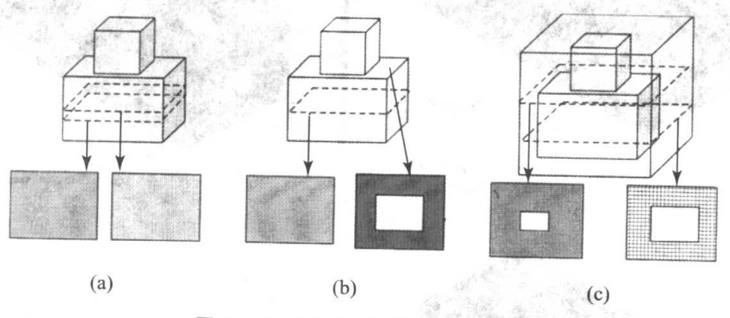


图 6.7-20　不同层片的不同填充处理

对于不包含内孔区域的单向栅线扫描，可以有两种方式实现相邻栅线扫描线段的连接：Z 字形连接（图 6.7-21a）和交叉换向连接（图 6.7-21b）。显然，交叉换向连接时空程距离较短，扫描效率高。对于切削加工如铣切，考虑到刀具旋转方向与行进方向的关系，有时不能采用交叉换向连接；但对于快速成形制造的各种工艺来说，都可以采用图 6.7-21b 的路径顺序。对于包含内孔的区域，可以采用图 6.7-21c、d 两种连接形式。对于 MEM 工艺，喷头喷丝开关响应速度较慢，在发出停止喷丝指令后，仍有少许丝喷出；若采用图 6.7-21c 的方式，容易在内孔表面形成节瘤，影响表面质量。采用图 6.7-21d 的方式，转接沿内孔表面进行，可以获得较高的表面精度。

③ 设计试验方案　着重比较不同的栅线扫描、偏置扫描，栅线扫描包括如单向栅线扫描、分区域栅线扫描、垂直

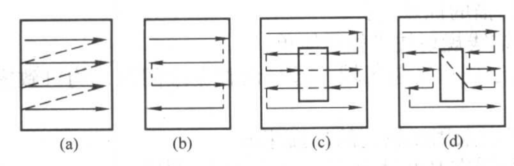


图 6.7-21　扫描路径的不同顺序

交叉栅线扫描、斜交叉栅线扫描。

扫描路径的规划是通过定义单元激活顺序来实现的。利用 MARC 中 uactive/active 模块。设计了如下一些试验方案（见图 6.7-22、图 6.7-23 和表 6.7-10）。

加工 20 mm × 8 mm × 6 mm 的方形件，环境温度 80℃，喷头温度 220℃，加工速度为 20 mm/s。

方案 1　单方向栅线扫描（沿长方向）

方案 2　单方向栅线扫描（沿短方向）

方案 3　垂直交叉栅线扫描（先 X 后 Y）

方案 4　垂直交叉栅线扫描（先 Y 后 X）

方案 5　偏置扫描（由里到外）

方案 6　组合扫描（外偏置扫描 1 圈、内垂直交叉栅线扫描）

方案 7　间隔扫描

图 6.7-22　方案 1～7 的总体应力分布图



图 6.7-23　方案 1～7 的 S1 点应力变化曲线图

（注：编排顺序同图 6.7-22）

表 6.7-10 各个方案下的最大应力，最大位移，最大反作用力

方案	最大应力 /MPa	最大位移 /mm	最大反作用力 /N
方案 1	18.95	0.204 6	0.933 5
方案 2	18.60	0.203 4	0.993 8
方案 3	18.79	0.202 6	0.973 9
方案 4	18.76	0.203 5	0.903 9
方案 5	17.59	0.201 4	0.927 8
方案 6	17.74	0.202 5	0.938 5
方案 7	12.11	0.140 1	0.610 7

分析：

方案 1～6 都属于密集扫描，而方案 7 为间隔扫描。通过比较最大应力值，可以发现，间隔扫描可以很有效地降低变形的可能，可以获得更好的零件质量。但这种扫描方式必然带来零件强度不高，粘接不牢。

方案 1～4 为栅线扫描，方案 5 为偏置扫描。栅线扫描应力更容易集中，变形大，而偏置扫描则比较容易获得高质质量的零件。

方案 1～2 为单方向栅线扫描，方案 3～4 为垂直交叉栅线扫描。这四种方案中，方案 2 即沿短边进行单方向栅线扫描，应力值要小，可以获得更好的质量。但是单方向扫描会造成零件各向异性。实际是不会采取的。而垂直交叉栅线扫描的两种方案（3 和 4），底层沿短边进行扫描（方案 4）要比底层沿长边进行扫描（方案 3）应力值要低，更容易获得高质量的零件。

方案 6 是组合扫描方式，外为一次偏置扫描，内为垂直交叉栅线扫描。这是实际造型中常采用的扫描方式，这种方式下应力值要低于其他各种栅线扫描，而高于偏置扫描。

所以，在保证强度的前提下，间隔扫描的应力状况最好，最不易变形；采用偏置扫描，应力状况比较好；栅线扫描方式下，先沿短边进行扫描，后沿长边扫描，应力状况要好于先长后短的情况。

工艺试验方案：

加工 50 mm × 20 mm × 15 mm 的方形件。环境温度为 80℃，喷头温度为 220℃，扫描速度 20 mm/s。

比较垂直交叉栅线扫描和组合扫描两种方式。实验结果显示，组合扫描方式下的零件精度要高于垂直交叉栅线扫描方式下的零件。

3.6 因素的综合影响

前面的论述中，分析了每个关键因素的影响，实际加工中，这些因素是共同作用的，所以我们更希望得到这些因素的综合影响。

设计了关于三个参数（喷头温度、环境温度、扫描速度）的试验方案，每个参数有两个可变值。方案见表 6.7-11。

表 6.7-11 综合因素的比较方案

实验方案：	喷头温度 /℃	环境温度 /℃	扫描速度 /mm·s^{-1}
方案 1	220	80	20
方案 2	220	80	200
方案 3	220	60	20
方案 4	220	60	200
方案 5	200	80	20
方案 6	200	80	200
方案 7	200	60	20
方案 8	200	60	200

由于扫描路径是一样的，应力状况基本上呈类似变化趋势，为了减少计算量，都只计算了第一层。计算结果见表 6.7-12。

表 6.7-12 各个方案下的最大应力，最大位移，最大反作用力

方案	最大应力 /MPa	最大位移 /mm	最大反作用力 /N
方案 1	4.313	4.279×10^{-2}	0.238 1
方案 2	3.986	3.392×10^{-2}	0.222 2
方案 3	4.930	4.885×10^{-2}	0.272 2
方案 4	4.549	3.860×10^{-2}	0.253 7
方案 5	3.695	3.661×10^{-2}	0.204 1
方案 6	3.407	2.883×10^{-2}	0.190 1
方案 7	4.312	4.268×10^{-2}	0.238 2
方案 8	3.967	3.347×10^{-2}	0.221 5

分析：

这 8 种方案中，方案 6 是最好情况。即喷头温度为 200℃，环境温度为 80℃，速度为 200 mm/s，最差方案是方案 3，即喷头温度为 220℃，环境温度为 60℃，速度为 20 mm/s。而在相同扫描速度下，保持喷头温度和环境温度差一致，应力状况也基本一致。可以发现提高速度，可以降低应力水平，但速度的影响不如温度的影响来的大。

最优工艺方案是在条件的允许下，使喷头温度和环境温度的温差尽可能的小。

工艺试验方案：

根据上面的分析，知道环境温度高，而喷头温度低，有利于减少变形。由于环境温度过高，对设备影响不利，喷头温度过低，丝的流动性降低，影响出丝。所以设计了如下两个试验方案。

零件　100 mm × 40 mm × 10 mm。

方案一　环境温度是 80℃，喷头温度是 200℃

方案二　环境温度是 60℃，喷头温度是 220℃

试验结果显示方案二的翘曲变形大于方案一。实验的结果验证了环境温度高，而喷头温度低，有利于减少变形。

比较环境温度的影响：

零件　100 mm × 40 mm × 10 mm。

方案一　环境温度 80℃，喷头温度 220℃

方案二　环境温度 60℃，喷头温度 220℃

试验结果显示方案一的变形小于方案二的变形。所以环境温度高，有利于减小变形。

比较喷头温度的影响：

零件　100 mm × 40 mm × 10 mm。

方案一　环境温度为 80℃，喷头温度为 220℃

方案二　环境温度为 80℃，喷头温度为 200℃。



两个方案变形差别不是很明显，可以发现喷头温度的影响比环境温度要小。

4　MEM工艺质量控制

MEM工艺中，工艺参数包括分层参数的设置、喷头出丝速度与扫描速度的配合以及各种温度的设置等各个方面。其中对成形质量有重要影响的因素有：材料的收缩与偏置、材料扫描路径的优化、扫描路径的数控代码编排、送丝速度与扫描速度匹配、喷头的启停响应和其他工艺规划等。

4.1　材料的收缩与偏置

MEM造型过程中，造型材料离开喷嘴后，将会逐渐冷却固化。随着堆积材料的冷却，由于材料的热胀冷缩效应材料会发生一定的收缩。因此在零件进行分层时要考虑这部分因素的影响。另外，网格线端点线宽也要进行补偿。对于图6.7-24a所示的层面区域，在生成填充网格线时依据的是轮廓的几何轨迹中心线，生成的网格线两端点应为网格线与轮廓的交点（图中的 A、B 两点）。在进行实际堆积成形时，堆积的物理线条均有一定的路径宽度（简称线宽）。对于封闭轮廓，堆积成的实体轮廓将以扫描轨迹线为中心线形成一定宽度的轮廓，对于单条网格线，将不仅形成以扫描轨迹线为中心线的一定宽度的路径，而且线条两端也会分别向外延伸半个线宽，如图6.7-24b所示。所以在进行层面堆积时，填充网格线的扫描轨迹线（图6.7-24a和c中的 A_2B_2）应在两端点处沿原始生成的几何线（图中的 AB）分别向内偏移一个线宽（Wpath），即补偿量 $\Delta C = AA_2 = BB_2 = W_{path}$。这样，堆积成的路径则为 A_1B_1，正好与轮廓堆积线良好地接触，既将全部区域填充饱满，又不会造成过堆积，从而形成较好的堆积质量。

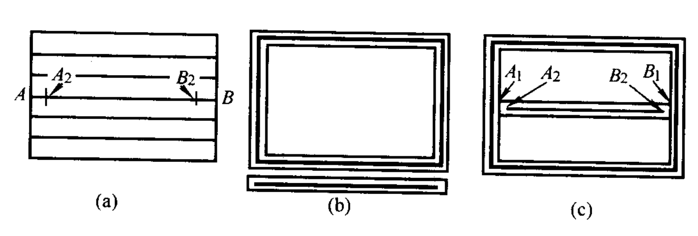


图6.7-24　网格线端点线宽补偿的原理示意图

因此，在实际的造型工艺过程中的轮廓数据必须进行由于这种材料收缩和偏置导致的不同轮廓环的处理，这样才能保证原型的尺寸误差。

4.2　连续路径

在MEM成形过程中，由于喷头的材料挤出运动的响应速度要远远小于运动系统的响应速度，因此在轮廓路径的转折处和网格的拐角处经常会产生材料堆积过多或者欠堆的现象，从而影响原型的尺寸精度和表面粗糙度。避免这种现象发生的有效途径就是通过路径优化，减少扫描路径中的转折处和拐角。

基于STL文件分层的层面几何路径具有如下特点。

1）分层路径只包含直线段，没有二次或高次曲线，如圆弧、抛物线等。

2）为使STL文件能较好地近似CAD模型，尤其是曲面形状比较复杂的CAD模型，STL文件中三角形面片必然较多、较小，这样分层后得到的轮廓多边形的边长比较短，边数较多。

3）轮廓多边形相邻边之间的夹角大小基本反映实际模型在该处的平缓程度。一般讲，模型越平缓，该夹角越接近于180°；反之，变化越剧烈，即曲率半径越小，则该夹角越小。

对于RP系统来说，由于层面路径短、数量多，而扫描速度又要求较高，二者之间存在较为突出的矛盾，这主要表现在：

① 加工多边形轮廓时，边数越多，则启停次数越多；边长越小，则由于加减速原因加工速度将被限制得越低。

② 在多边形顶点处，由于扫描的启停及加减速的原因，堆积强度较难控制，容易造成一定程度的过堆积或欠堆积，影响原型成形精度和外观质量。对于MEM工艺，喷头出丝响应性能较差，这种影响尤为严重。

③ 多边形边数（即折线多少）直接影响代码长度。路径越多，边长越小，则生成的代码也越长，数据传输与处理时间也越长。

④ 路径长度过小将给代码生成带来一定的计算困难。

针对RP分层路径信息特点与扫描速度要求高的矛盾，可以采用下述几种扫描控制方法予以解决。

1）圆弧重新拟合法　即对于原型每一层构成轮廓的多边形环进行曲线拟合，从而增加单条路径的平均长度和轮廓的平滑性。由于多数数控系统具有圆弧插补功能，因而可以用多段首尾相连的圆弧拟合多边形环，以提高扫描速度，并且能改善成形件的表面质量，如图6.7-25所示。这种方法对于以外部轮廓加工为主的RP工艺（如SSM）效果最佳。这种方法的主要问题在于，原型本来不是曲线的部分被拟合为曲线，必然带来二次近似误差（也称拟合误差）。

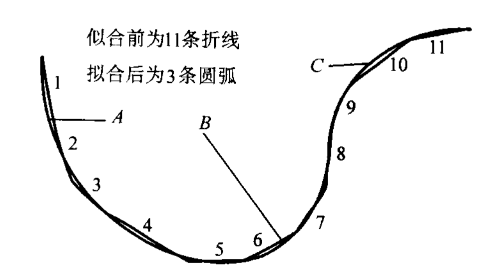


图6.7-25　对折线进行圆弧拟合

2）B样条曲线拟合　目前，较好的数控卡提供的SPLINE（样条）插补的运动形式，对于PMAC数控卡，提供均匀非有理三次B样条和不均匀非有理三次B样条插补运动形式，另外PMAC还提供了位置－速度－时间（PVT）模式运动，可以更好地控制轨迹图形。图6.7-26是B样条曲线拟合折线的结果，从拟合效果可以看出，这种拟合还是光滑而且最大的逼近曲线。在操作性上它比圆弧拟合要好。它的控制点正好是STL分层后得到的离散多边形，不需要额外的计算。它同样能提高原型的表面质量。

3）连续路径扫描法　这种方法针对按某种规则定义的连续路径进行扫描控制，是一种特殊的插补运行方式。所定义的连续路径可以包含多段首尾相连的线段和圆弧，数控系

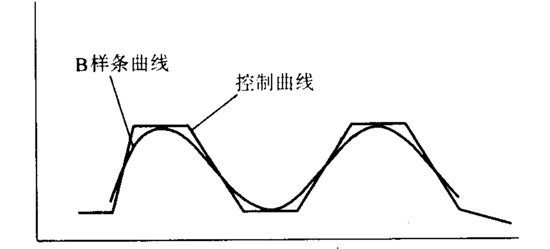


图 6.7-26 B样条曲线拟合折线

统将整个连续路径作为一条特殊的路径扫描。在整个连续路径上，除开始的加速段和最后的减速段外，其合成速度保持恒定，即

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \text{const} \qquad (6.7\text{-}17)$$

这样由于合成扫描速度的大小恒定，因而在扫描堆积中，堆积速度无需变化，这对于堆积控制以及减小扫描机构振动均有利。显然合并后生成的连续路径的平均长度要远大于单条折线长度，因而扫描效率较高。而且由于在中间各拐点处扫描是连续的，因而成形零件的表面质量较好。对于一般原型，构成每一层轮廓的几十条甚至上百条折线通常可以合并为几条连续路径。特别地，对于回转体类原型，分层后每一层轮廓为许多折线首尾连成的近似于圆的多边形，这时所有折线通常可以合并为一条连续路径。

实践表明，采用连续路径扫描法生成 NC 代码，可大大提高连续不停顿扫描的单条路径平均长度，从而实现较高速度和高效率的扫描，减少启停次数，也会大大改善原型表面质量和精度。而且，STL 离散精度要求越高，则在分层路径中，轮廓多边形环边数越多，边长越小，使用连续路径扫描方式越能提高成形效率。

4.3 送丝速度与扫描速度匹配

连续路径解决了路径的转折处材料堆积过多的问题，但是成形质量的另外一个问题在于不同扫描速度和喷头出丝速度的匹配。如果这两者不匹配，成形时出丝就会时而过堆积，时而欠堆积，反映在成形零件上就是壁厚不均匀，强度不均匀，尺寸精度差。因此研究扫描速度和喷头出丝速度的匹配关系非常重要。

以清华大学开发的螺杆挤出喷头为例，由于该喷头采用螺杆挤出方式，在材料和喷头温度一定时，出丝速度只与螺杆转速有关。因此扫描速度和喷头出丝速度的匹配可简化为喷头扫描速度与螺杆转速之间的匹配关系。

以 MEM300－II 型设备为例，其他参数设定为：喷嘴直径 0.3 mm，成形室温度保持在 70℃，喷头温度为 230℃，成形材料 ABS，进行实验。成形零件为三层壁厚的圆桶型工艺品，考察其出丝的粗细，层与层之间的粘接效果以及表面质量。实验结果见表 6.7-13。

表 6.7-13 $\Phi 6$ 螺杆挤压喷头速度匹配关系表

扫描速度 $/\mathrm{mm \cdot s^{-1}}$	喷头螺杆转速 $/\mathrm{r \cdot s^{-1}}$	现 象 结 果
20	1.4	过堆积，表面质量差
30	1.05	过堆积，表面质量差
50	1.05	合适，表面质量好，层与层之间粘结好
50	2.1	过堆积，表面质量差
70	1.05	微细，层与层之间部分粘结
70	2.1	合适，表面质量好，层与层之间粘接好
70	3.15	偏微细，层与层之间部分粘接
90	1.05	细，层与层之间小部分粘接
90	2.1	微细，层与层之间部分粘接
90	3.15	较合适，层与层之间大部分粘接
110	1.05	很细，层与层之间无粘接
110	2.1	微细，层与层之间大分粘接
110	3.15	较细，层与层之间部分粘接

由表 6.7-13 可以看出，对于此种喷头，有三个组合匹配关系较好：扫描速度为 50 mm/s，喷头的螺杆转速为 1.05 r/s；扫描速度为 70 mm/s，喷头的螺杆转速为 2.1 r/s；扫描速度为 90 mm/s，喷头的螺杆转速为 3.15 r/s。其中扫描速度分别为 50 mm/s、70 mm/s 时，都有很合适的螺杆转速与其匹配，当扫描速度达到 110 mm/s 的高速时，喷头的螺杆转速已经不堪负荷了，出丝已经稍细了。因此对于此种喷头，其最大轮廓成形速度以不超过 70mm/s 为宜。由于支撑对喷头出丝的合适度没有很高的要求，在很多情况下，出丝稍细反而有利于支撑的去除和取型，因此支撑的扫描速度最高可达 110 mm/s。

从上面的实验结果可以看出，扫描速度的匹配跟喷头的挤出能力有关，因此不同的喷头将会有不同的扫描匹配速度。比如改进喷头的螺杆，采用是变螺深或变螺距螺杆，则喷头挤出能力就会大大增强。喷头设计改变，不但扫描速度和螺杆转速的匹配发生改变，而且最大的扫描速度也会改变。清华大学激光快速成形中心在此基础上对上述喷头进行改进，大大提高了喷头的出丝能力。经在 MEM600－I 型设备上检验，新喷头采用 0.5 mm 喷嘴时，其最大扫描速度仍可达到 150 mm/s。

4.4 喷头的启停响应

在 MEM 工艺过程中，经常会发现轮廓的接缝处的质量比较差。在没有进行喷头启停响应控制之前，原型接缝处会出现“硬疙瘩”。而当意识到这个问题时加上喷头启停响应后，又时常会发生“开缝”。这些问题都是喷头启停需要研究的问题。

喷头的启停响应实际上是一个超前控制的过程，或者叫前馈控制。如图 6.7-27，当计算机发出喷头出丝的信号后，由于一系列信号的处理过程，以及机械系统和熔融体的滞后效应，实际出丝的响应曲线如图中虚线所示。同样在计算机给出让喷头停止出丝的信号时，也会有滞后效应。另外，喷头启停响应需要跟连续路径统一起来，以达到更好的轮廓接头质量。

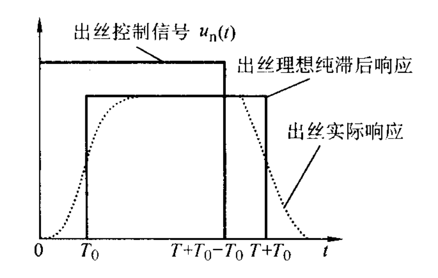


图 6.7-27 出丝超前控制信号及其响应曲线

MEM 工艺在造型过程中喷头的启停响应实际处理示意图如图 6.7-28：$P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_7-P_7-P_1$ 是需要造



型的实际轮廓，那么为了保证连续路径，需要运动系统从 A'_0 开始（在到达 A_0 之前已达到要求的扫描速度 V），运动到 A_0 时给出丝控制信号（线段 A_0-P_1 的长度跟扫描速度 V 和喷头出丝延迟时间有关，线段 A'_0-P_1 最好与真实轮廓的第一条线段 P_1-P_2 在一直线上），然后喷头沿 $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_6-P_7$ 扫描，到 A_1 时给关丝信号（线段 A_1-P_1 的距离与扫描速度和喷头关丝的延迟时间有关），然后继续运动到 A'_1（不要使喷头呆在接缝处，产生"流涎"使接缝处材料过堆积）。

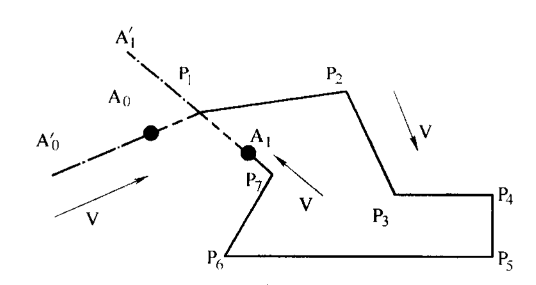


图 6.7-28 MEM 工艺喷头启停响应示意图

同样，对于网格填充来说也有喷头启停响应的问题，可以按照上面的原理进行处理。但对于网格来说，它的喷头启停响应不是关键问题。因为网格是在原型的内部，缺陷在 MEM 工艺的层层堆积过程中被掩盖了。

4.5 路径的数控代码编排

对于 MEM 工艺来说，提高它的造型质量的原则是：使用连续路径扫描，可大大提高连续不停顿扫描的单条路径平均长度，从而实现较高速度和高效率的扫描；减少启停次数，也会大大改善原型表面质量和精度。但是对于 AT6400 数控系统来说，即使轮廓和网格使用了 PLIN 命令，使路径连续扫描，但仍然有路径之间的编排与优化的问题。解决了这个问题，能大大提高造型的质量。

数控代码对路径的编排一般来说有两种。

方法一：产生一条路径，编译一条路径，执行一条路径，删除当前路径；接着开始下一条路径，编译下一条路径，执行下一条路径，删除当前路径；依次类推，直到所有的路径执行完毕。

这种方法比较常用，对于 LOM 工艺来说，由于激光开关比较易于控制，选用这种方式比较合适，由于路径的产生和编译都是独立的，造型显得比较连续。但对于 MEM 工艺，由于其每条路径之间都要停顿，这样都需要开关阀一次，这种停顿间隙会导致轮廓之间的连接质量下降，从而使原型的质量下降。

方法二：产生一条路径，编译当前路径；产生下一条路径，编译此条路径。依次类推，直到所有路径都产生、编译完毕。然后依次执行每条路径，删除当前路径，直到所有路径都执行。

这种方法贯彻了 MEM 工艺的造型原则，几乎消除了路径之间的停顿，从而减少喷头的开关次数，提高了造型质量。

其实，这种编排方式是由于数控系统能力不足导致的，对于 PMAC 或 Motion 数控系统，则最好使用双缓存连续扫描。这个问题在软件规划应给予充分考虑。

4.6 其他工艺性方法

对于 MEM 工艺，除了上面所说的主要方法外，还有一些方法也影响 MEM 工艺的造型质量。因此，我们也要适当注意它们。

1）不同扫描区域升降工作台处理　对于一般零件，进行每个层面扫描时，不可能从头到尾都能连续扫描，往往需要分成若干区域，分别进行连续扫描，而在不同区域间将进行停顿间隔处理。由于材料的弹性，在堆积过程中又经受喷头的压缩，在喷头移开后，已堆积部分往往稍微向上凸起一些，所以已堆积层面部分的上表面往往要稍高于喷头底面。如果喷头此时在该部分所在位置处移动，将在已堆积层面部分的表面留下划痕，并推动多余材料随喷头移动，随机地将其遗留在零件表面，影响后续扫描过程，对成形精度造成影响。所以在进行层面填充时采用不同扫描区域升降工作台处理，避免喷头在移动过程中对成形表面的损伤，从而有利于精度的提高。

2）层面内部高速填充和智能网格　对于通常零件，层面内部填充区域面积远远大于轮廓线所占面积，所以进行层面内部填充时所花费的时间将占据层面全部扫描时间的绝大部分，层面内部填充效率对总成型时间影响很大。为提高零件成形速度，在进行层面内部填充时采用高速扫描方式，即采用较宽线条和较快速度进行内部填充，这样根本不会影响层面成形精度，而使成形效率大大提高。同时，由于每层扫描时间大大缩短，可采用更小的层厚进行堆积，从而也可以在不增加扫描时间的前提下间接提高成形精度。另外，可以根据轮廓的信息和成形件的特征信息来划分智能网格。一方面，使成形件表面的那些层加密；另一方面，在成形件的内部使用较稀疏的网格。这样可以大大提高成形效率而同时又保证了表面质量。

5 熔融挤出成形工艺典型设备

5.1 美国 Stratasys 公司

熔融挤出制造工艺成形系统最早由成立于 1988 年的美国 Stratasys 公司开发并商品化。该公司从 1991 年起，先后推出了基于熔融挤出工艺的 FDM 系列成形机。长期以来，该公司在 MEM 工艺设备方面一直处于领先地位。目前 Stratasys 公司推出的 MEM 系统的主要型号及性能见表 6.7-14。

表 6.7-14 Stratasys 典型熔融挤出成形设备一览表①

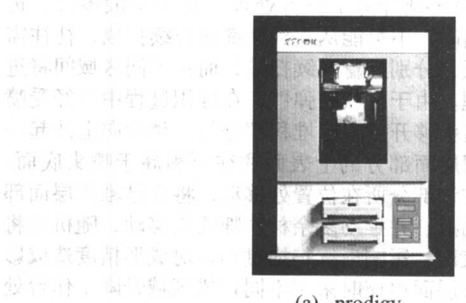
型　号	最大成形空间/mm	成形材料	精度/mm	其　他
Prodigy Plus	203×203×305	ABS	±0.127	水溶性支撑
FDM3000	254×254×406	ABS，WAX	±0.127	水溶性支撑
FDM8000	457×457×609	ABS	±0.127	成形 ABS 时可用水溶性支撑材料
FDM Titan	406×335×406	PC，ABS，PPSF	±0.127	可成形材料最多的设备
Quantum	600×500×600	ABS，PC，WAX	±0.127	磁悬浮定位，双独立喷头
FDM Maxum™	600×500×600	ABS，ABSi	±0.127	水溶性支撑
Dimension	203×203×305	ABS	—	基本型无水溶性支撑改进型 Dimension SST 型具备可溶性支撑

① 摘自 Stratasys 商业宣传材料。

从FDM3000型设备开始，Stratasys公司针对ABS材料的成形推出了可溶性的支撑材料。可溶性材料的引入，大大降低了支撑去除的难度，使得MEM工艺在成形具有复杂内腔零件时，比那些无需外支撑的成形工艺诸如激光选区烧结以及三维打印成形，更具优势。除了Genesys机型外，Stratasys公司推出的其它机型都是双喷头结构。即一个喷头堆积成形材料，另一个喷头堆积支撑材料。但除Quantum外，其它型号的两个喷头都相互集成，共用一套XY扫描系统。FDM Quantum设备由于采用磁悬浮技术，应用平面电机作为XY扫描机构的运动单元，因此配备两个独立喷头，每个喷头具备独立扫描的能力。

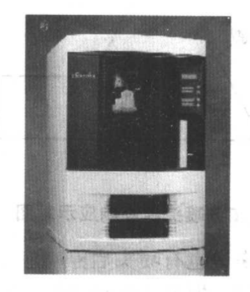
2002年2月Stratasys推出了畅销机型Dimension。该设备在Prodigy的基础上改进而来，主要定位于办公应用以及概念模型的成形。目前只可成形ABS材料，成形精度与Stratasys公司的其他设备相比略有下降。最初的Dimension设备只能使用普通的剥离支撑（break away support system，简称BASS）。Stratasys公司在2004年2月推出的Dimension SST中，配备了可溶性支撑。该公司除了开发了多种型号的FDM系列设备外，还开发了多种FDM成形材料，包括ABS，ABSi，铸造石蜡和橡胶等。新近又开发成功PC，PC/ABS合金以及PPSF材料。但在实际应用过程中仍以ABS应用范围最为广泛。

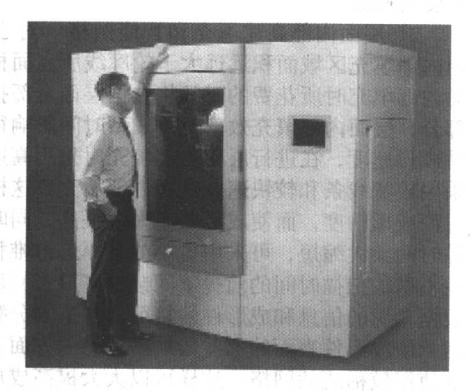
图6.7-29是几种设备的外形图。


(a)　prodigy



(b)　FDM3000


(c)　Dimension


(d)　Quantum

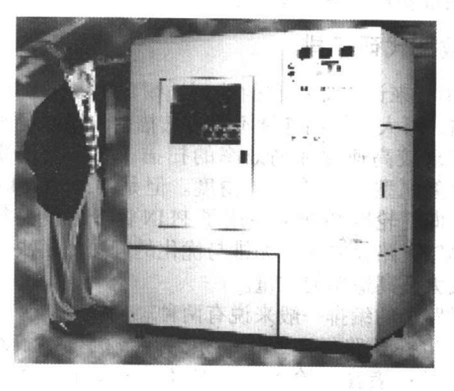

(e)　FDM8000

图6.7-29　部分Stratasys公司成形机
（来自Stratasys公司宣传材料）

5.2　北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司

北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司，以清华大学激光快速成形中心（CLRF）为技术依托，是国内最早从事快速成形设备及工艺研究开发的单位，其研究水平代表了国内熔融挤出制造技术的最高水平。该公司研制的主要设备型号以及性能见表6.7-15和图6.7-30。

除进行传统MEM工艺及设备研究外，该公司还研制成功一系列专门应用于生物医学领域的MEM设备。利用该类设备进行组织工程细胞载体支架的成形。

表6.7-15　CLRF熔融挤出成形设备一览表

型　号	最大成形空间 /mm	成形材料	精度 /mm	其他
MEM300－II	300×300×300	ABS	±0.12	单喷头
MEM600－I	600×500×500	ABS	±0.15	单喷头
MEM200－D	200×200×200	ABS	—	桌面型设备
MEM250	250×250×250	ABS，蜡	±0.2	办公应用

与美国Stratasys公司相比，国内开发的MEM成形系统有如下特点：结构简单；运行、维护成本低廉；成形稳定可靠，精度与国外设备相当；喷头材料挤出能力强，最大扫描速度较高。清华大学开发成功的螺旋挤出喷头，其最大出丝能力为14.1 mm^3/s，挤出效率远高于Stratasys公司的喷头。装备此型喷头的MEM600－I型设备，其最大造型扫描速度可达150 mm/s，远高于国外同类产品。





(a) MEM350　(b) MEM300－Ⅱ

(c) MEM200－D　(d) MEM600－I

图6.7-30 北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司开发的MEM设备
（北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司提供）

6 熔融挤出快速成形工艺的典型案例

熔融挤出成形技术因其成形材料广泛、设备运行成本低廉、精度高的特点，成为应用最为广泛的快速成形技术之一。从快成形技术应用的传统领域，如新产品开发、装配检测、功能检测，到快速制造，甚至生物医学领域都能见到熔融挤出成形技术的身影。

6.1 熔融挤出成形工艺在产品开发中的应用案例

快速成形技术应用的一个重要领域就是新产品开发。在这方面，由于MEM可以采用ABS、PC等高性能材料，制作具有优良综合性能的模型零件，可以满足在新产品开发过程中从外形设计、模型展示到装配干涉、部分功能检测等诸多阶段的要求。该工艺可用于新产品外观设计验证和结构设计验证，发现设计缺陷，完善产品设计。典型应用案例如下。

（1）汽车轮毂（图6.7-31）

图示为吉普车轮毂，尺寸约为200 mm×200 mm×63 mm，在北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司出产的MEM300－Ⅱ型设备上成形，成形时间约为10 h。

（2）车载电话部件（图6.7-32）

图示为某轿车车载电话部件，尺寸约为80 mm×50 mm×40 mm，采用MEM工艺，在北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司出产的MEM300－Ⅱ型设备上成型，时间约为2 h。

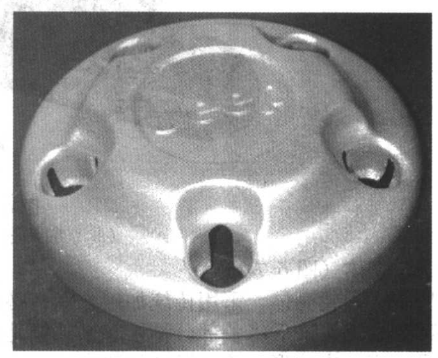


图6.7-31 汽车轮毂
（北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司提供）

（3）车用空调出风口（图6.7-33）

图示为某车型空调出风口，尺寸约为50 mm×40 mm×30 mm，采用MEM工艺成形，时间约为3 h。

（4）车门把手

图6.7-34所示为某车型的车门把手。此案例中采用MEM工艺一次制作出原型。制作出来的塑料样品具有可装配性，并可以翻制硅胶模具，小批量生产注塑件。原型还可以进行电镀处理，与实际产品更加接近，一次就可完成外观验证和结构验证。

图中所示车门把手尺寸约为80 mm×40 mm×30 mm，采用MEM工艺成形，在MEM300－Ⅱ型设备上成形，时间约为3 h。

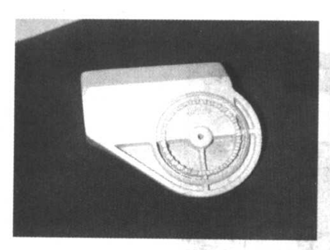
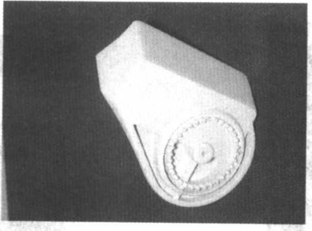
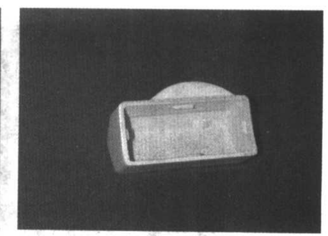




图 6.7-32　车载电话
（北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司提供）

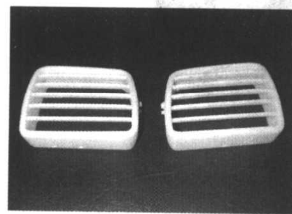
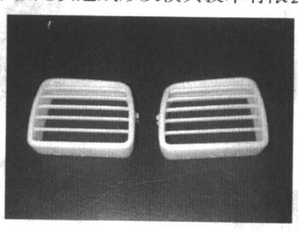
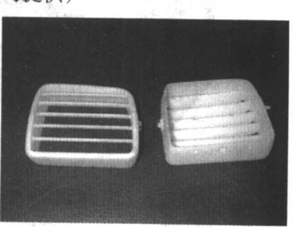
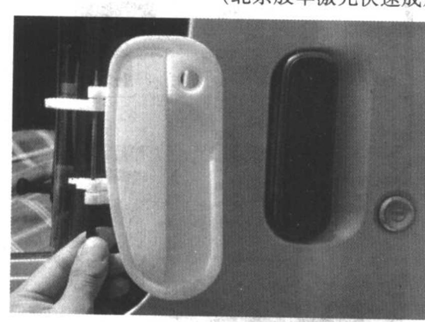
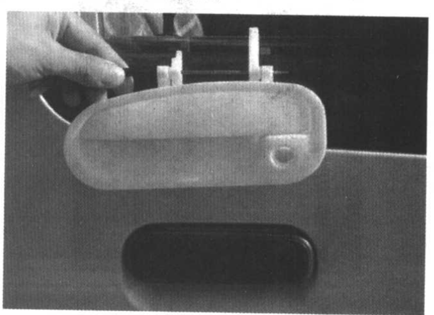
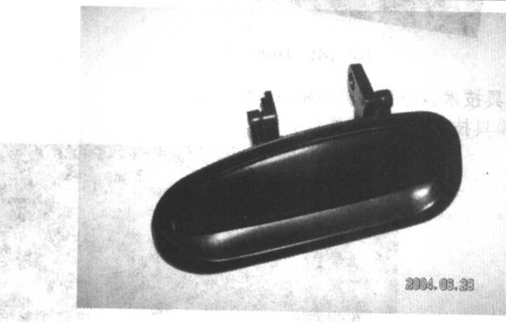




图 6.7-33　车用空调出风口
（北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司提供）

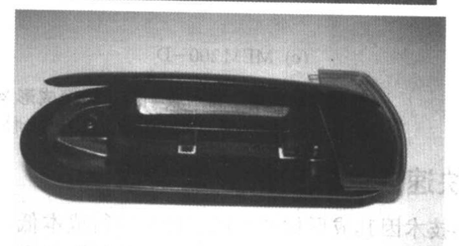


图 6.7-34　车门把手原形及注塑件
（北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司提供）

（5）涡轮壳体（图 6.7-35）

图中所示为涡轮壳体，采用传统加工方案，必须将产品分成若干部分加工，最后将各部分粘接起来。但是这些方案都不能满足厂家一次成形、验证设计的要求。

基于 MEM 技术的壳体制作过程如下。

计算机三维造型；

通过专用软件将其转换成二维层片数据；

利用快速成形设备将外形直接制作出来。

此案例为涡轮壳体，验证外观设计和结构设计。尺寸约为 350 mm × 250 mm × 200 mm，采用 FDM 工艺成型。

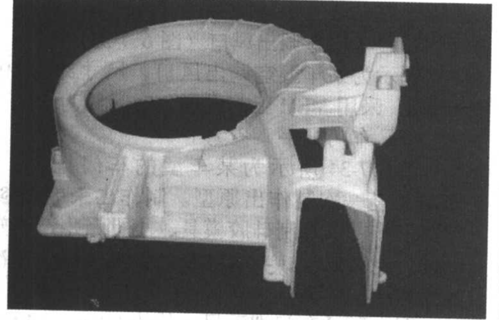
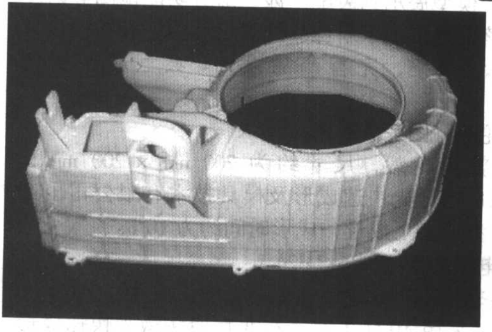



图 6.7-35　涡轮壳体
（北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司提供）



6.2　基于熔融挤出工艺的快速制造以及快速工具应用案例

熔融挤出成形技术成形的零件具有较好综合力学性能，随着 ABS、PC、PC/ABS、PPSF 等高性能材料的研制成功，熔融挤出制造工艺可直接生产具有优良综合性能的零件，可以直接满足电子产品、汽车仪表盘等方面的使用要求，甚至可以满足某些对零件性能要求较为苛刻的场合的应用。如美国 Stratrasys 公司为其大型熔融挤出制造设备开发了高性能的 PC 基材料来实现直接功能零件的制造。Stratrasys 公司的 Quantan 设备曾在 4 h 内使用 PC 材料为某生产线制造了一带轮，用以替换生产线上已经损坏的铝制带轮。该带轮在生产线上正常工作了长达 4 个星期之久。

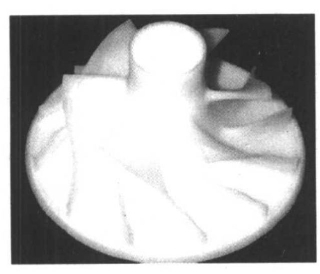
（1）基于 MEM 工艺的 rapid casting 工艺

基于 MEM 的快速铸造技术（rapid casting）是将熔融挤出制造技术与熔模铸造技术相结合的产物。该技术中，MEM 工艺制作的实体模型被当做铸造的熔模，这也是一种直接 RP－铸型制造。与 SLA 或者 SLS 等 RP 工艺相比，MEM 工艺不使用激光，而使用微滴微流喷挤使能技术，设备成本及维护费用低，原型制作成本低。MEM 工艺可成形材料广泛，目前已经成功应用于快速铸造的材料有石蜡和 ABS 工程塑料。

1）石蜡原型　MEM 技术与熔模铸造相结合有天然的优势——MEM 可以直接使用目前熔模铸造中的“标准”石蜡材料制作蜡模，可直接应用于现有的熔模铸造工艺。但是石蜡材质脆软，力学性能差，MEM 工艺制作的蜡制模样在运输过程中很容易损坏。此外，受石蜡材料本身性能的限制，MEM 工艺对石蜡的成形精度要低于 ABS 等材料的成形精度。熔模铸造过程中蜡模需要经过多次挂浆，对其机械强度有一定的要求。为提高效率，一般将 MEM 蜡模设计成中空结构，或者在中空结构内部添加三角形或六边形支撑以提高强度。MEM 蜡型的最小壁厚以及某些精细结构的最小尺寸均有严格要求，不能过小。

2）ABS 原型　为改进蜡模的上述缺点，人们开发了可用于 MEM 工艺的 ABS 材料。ABS 是一种聚合物高分子材料，它作为工程材料，具有良好的可成形性能和优良的综合力学性能，已成为 FDM 工艺目前的最广泛使用的成形材料之一。目前 FDM 工艺对 ABS 材料的成形精度可达 ±0.1 mm。ABS 材料具有良好的综合力学性能，因此模样可采用更小的壁厚以及更少的内部支撑，从而节约了成形时间。ABS 原型可采用更精细的打磨等后处理工艺，模样的表面质量优于蜡模。在熔模铸造过程中需要对 ABS 模样进行烧除处理，烧除时以不结焦，少灰分为最佳。

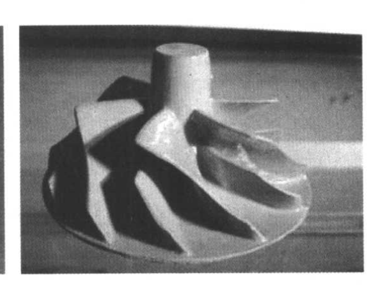
（2）增压涡轮（图 6.7-36）




(a)　RP原型



(b)　树脂模



(c)　硅橡胶模

图 6.7-36　增压涡轮

（北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司提供）

增压涡轮由于其叶片形状复杂，叶片之间部分重叠，采用传统工艺加工费时费钱，开发风险大。采用快速成形、快速模具技术能够方便、快捷、经济地制作出合格工件。

其技术路线为：

CAD 模型→RP 原型→环氧树脂模→硅橡胶模→石膏模→铝合金产品

首先利用 MEM 工艺快速成形 RP 原型。采用环氧树脂作为模具主要材料，以 RP 原型为母模，在 RP 原型表面涂一层环氧树脂，在后面填充混有金属粒的环氧树脂作为背衬，脱模得到金属基环氧树脂模。它主要用作注塑模得到硅橡胶件，其寿命一般为 500～2 000 件。由硅橡胶模翻制石膏件，其寿命一般为 1 000 件左右。因此，整套模具能够产生的铝合金产品数量达几十万件。

MEM 原型制造的主要步骤如下。

1）由 CAD 模型获得精确的 STL 文件数据；

2）从开始造型时就考虑减少以至消除台阶效应；

3）获得数控的 NC 代码；

4）进行路径规划，选取最佳路径；

5）进行熔融沉积，控制喷头的喷嘴直径，控制喷射温度和成形室温度，使得制造的原型的精度和强度最高；

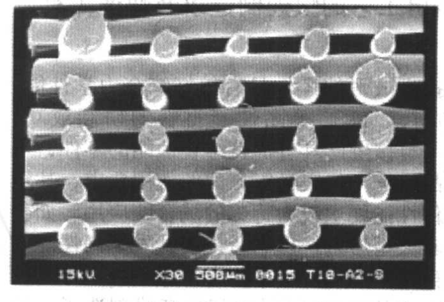
6）对制造出的原型件进行后处理。

6.3　MEM 技术在医学组织工程降解支架成形的应用案例

新加坡国立大学的 Dietmar W. Hutmacher 以及 Iwan Zein 等人采用熔融挤出技术，成形 PCL 材料，制作组织工程用支架。MEM 技术可以精确的成形直径 200 μm 以上的大孔，并保证大孔间的相互贯通性。经检测，Hutmacher 等人制作的支架大孔直径在 160～700 μm 之间，材料路径 260～370 μm，孔隙率在 48%～77%之间，具有较好的力学性能。图 6.7-37 是 Dietmar W. Hutmacher 采用 MEM 工艺成形的支架的电镜照片。



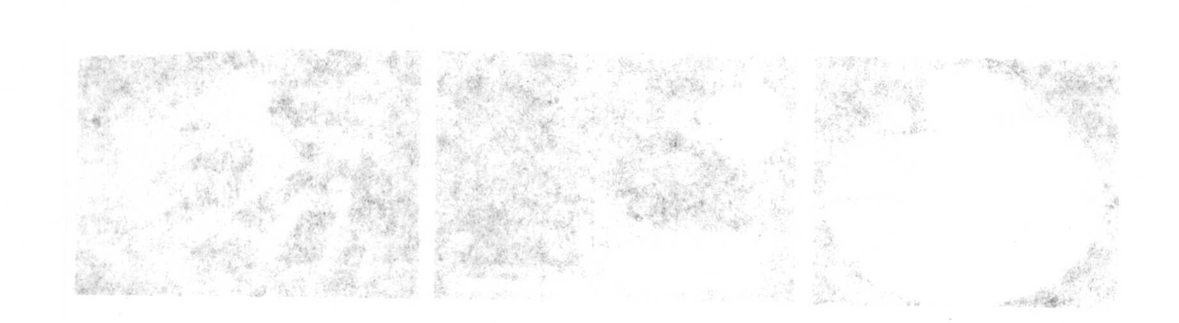
(a) 大孔支架



(b) 截面照片

图 6.7-37　MEM 工艺成型的组织工程支架照片

编写：张　磊（清华大学）



第 8 章　三维打印快速成形工艺

1　三维打印快速成形工艺原理

1.1　三维打印快速成形工艺

三维打印快速成形工艺（three dimensional printing，简称3DP）工艺是美国麻省理工大学 E.M.Sachs 教授等学者开发的一种快速成形工艺，并于 1993 年申请了 3 个专利。和选区激光烧结工艺一样，该工艺的成形材料也需要制备成粉末状；所不同的是，3DP 采用喷射黏结剂粘接粉末的方法来完成成形过程。其具体过程是：首先底板上铺一层具有一定厚度的粉末；接着用微滴喷射装置在已铺好的粉末表面根据零件几何形状的要求在指定区域喷射粘接剂，完成对粉末的粘接；然后工作平台下降一定的高度（一般和一层粉末厚度相等），铺粉装置在已成形粉末上铺设下一层粉末，喷射装置继续喷射以实现粘接；周而复始直到零件制造完成。没有被粘接的粉末在成形过程中起到了支撑的作用，使该工艺可以制造悬臂结构和复杂内腔结构而不需要再单独设计添加支撑结构。造型完成后清理掉未粘接的粉末就可以得到了需要的零件。其过程如图 6.8-1 所示。在某些情况下还需要类似于烧结的后处理工作。

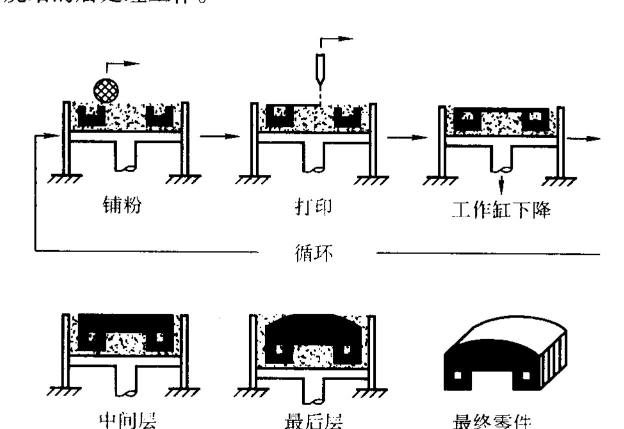


图 6.8-1　3DP 工艺流程图

1.2　三维打印快速成形工艺的特点和优势

3DP 工艺最大的特点是采用了数字微滴喷射技术。数字微滴喷射技术是指在数字信号的控制下，采用一定的物理或者化学手段，使工作腔内的流体材料的一部分在短时间内脱离母体，成为一个（组）微滴（droplets）或者一段连续丝线，以一定的响应率和速度从喷嘴流出，并以一定的形态沉积到工作台上的指定位置。如图 6.8-2 所示。该图显示了数字微滴喷射过程模型，一次数字脉冲的激励得到一个射流脉冲，射流脉冲的大小与激励信号的脉宽有关，当这个激励信号的脉宽极小的时候，射流（实际上已被离散为尺度为数十至数百微米大小的微滴）成为一个微单元（即一个微滴），可用数字技术中"位"的概念来描述，此时模型成为一种新的数字执行器的原型，喷头的流量由数字激励信号的频率和脉宽来进行控制。当射流的连续喷射时，可视为是激励信号全为 1 输出的特例。

上述分析揭示了一种新型的微制造技术，本书称为数字微滴技术。它是数据与信号处理技术、微制造技术、材料科学、计算机科学等技术和科学集成发展的高技术。它包括数

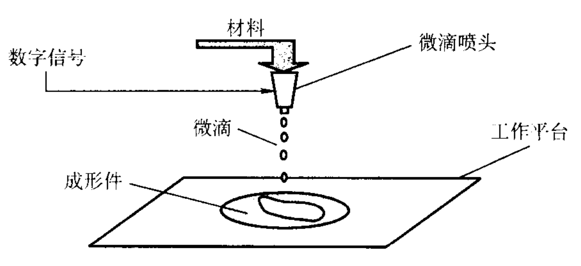


图 6.8-2　微滴喷射技术示意图

字微滴（微流）喷射（挤出）驱动、微滴（流）的输运、沉积（着陆）形态控制等技术。从微输运的角度分析，笔写（或直写）技术与数字微滴技术属于同一范畴。采用激光束的微滴捕获、输运和沉积技术与细胞受控组装技术相结合，形成细胞激光直写（laser direct writing）技术方法，则是笔写技术的新发展。

用于 3DP 的数字微滴技术主要是微滴喷射技术，其特点如下：

1）微输运过程对激励信号具有快速响应性；

2）微输运的流量可以用数字信号控制；

3）可以精确控制微输运材料单元的落点及着陆形态。

数字微滴技术是近几十年日益受到重视的一门技术，尤其在喷墨打印领域已经得到非常广泛的应用。上世纪 70 年代末，Canon 公司的一位工程师偶然将一块电烙铁放在装有水的针头上，水竟从针头喷出。这一现象给了工程师们极大的灵感和启示。Canon 公司看准这一目标，耗资 500 亿日元（约 4.5 亿美元），经过 10 余年的研究和完善，成功地将喷墨技术应用到打印机、传真机、复印机、文字处理机、缩微系统和桌面印刷系统等涉及到输出文字和图像的设备上。

喷墨打印技术可以看作是数字微滴技术在二维空间中的应用，喷射技术应用在快速成形领域，则是试图在三维成型领域得到应用。

基于数字微滴喷射技术的 3DP 工艺具有如下特点：

1）成形效率高。由于可以采用多喷头阵列，因此能够大大提高造型效率。

2）成本低，结构简单，易于小型化。微滴喷射技术无需用到激光器等高成本设备，故其成本相对较低，而且其结构简单，可以进一步结合微机械加工技术，使系统集成化、小型化，是实现办公室桌面化系统的理想选择。

3）可适用的材料非常广泛。从原理上讲，只要一种材料能够被制备成粉末，就可能应用到 3DP 工艺中。在所有快速成形工艺中，3DP 工艺最早实现了陶瓷材料的快速成形。目前其成形材料已经包括塑料、陶瓷和金属材料等。

在 3DP 工艺的开发中，数字微输运技术和成形材料是研究的重点。清华大学激光快速成形中心在国家自然基金的支持下对各种材料微输运技术进行了较为深入的研究工作，并取得了许多成果。其中，基于螺旋挤压方式的连续喷射方法已经应用于商品化成形设备中；基于压电晶体的按需喷射方法也取得长足进展，并已应用于生物制造和无木模成形工艺中。下面对主要的材料微输运技术进行介绍，并总结清华研究工作的成果和经验，供读者参考。

2　三维打印快速成形工艺的使能技术——数字微滴喷射技术

微滴喷射的关键技术之一是驱动技术。驱动技术的选



择，直接决定了驱动器的整体设计方案，也决定了其可能达到的最佳性能。材料数字微滴喷射技术对于驱动器的要求是：响应速度快、运动精确可控、耗能少；同时要求体积小、易于集成化、加工方便。

2.1 微滴喷射微输运方法

微滴喷射技术是指在喷头驱动力的作用下，在喷嘴处喷射形成离散或者连续的液滴，然后定时定量输送到指定的位置完成堆积成形。产生微滴的方法很多，按照提供驱动能量形式的不同可以分为：电磁驱动、超声波驱动、压电驱动、磁致伸缩驱动等；按照主要驱动器件是否同时提供给流体喷射动力和启停控制可以分为泵式、阀式等。由于成形过程主要关心的是微滴的形态和速度，本书将按照产生液滴的速度、形态将实现微滴喷射的技术分为雾化、连续喷射和按需滴落三类，如图 6.8-3 所示。

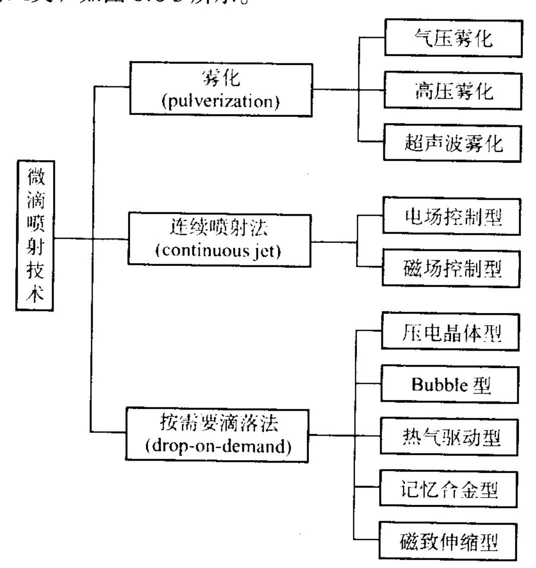


图 6.8-3 微滴喷射技术的分类

2.1.1 雾化喷射法

将流体雾化后可以获得的直径在微米量级的液滴，以满足特定的要求。它主要有气压雾化、高压雾化和超声波雾化三种形式，由于雾化方法不能精确控制微滴大小、形态以及落点，故很难应用于成形领域。

2.1.2 连续喷射法

连续喷射法分为电场控制型和磁场控制型，其中使用较多的是电场控制型。它的工作过程是将液体高速喷出后，利用压电晶体高频振动将连续射流离散成液滴，随后液滴通过高压电场被充电，当液体被充以不同的电荷时，经过偏转电场时会产生不同的偏转，从而可以控制液滴喷射到不同的位置。如图 6.8-4 所示。

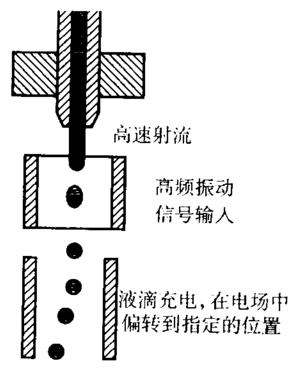


图 6.8-4 连续喷射原理示意图

连续喷射技术中液滴产生的原理是利用了连续射流的不稳定性，极细射流在表面张力的作用下将分解成液滴，液滴的产生频率可以通过加在射流上的高频振动频率来调节。连续喷射液滴速度在 10 m/s 左右。

由于存在充电过程，连续喷射方式使用的材料受到一定的限制，比如喷射的材料为生物材料时充电过程中有可能发生材料性能上的变化；并且连续喷射方式会导致很大的浪费，特别当喷射的物质比较昂贵时。连续喷射方式需要一套液滴回收系统。该系统结构复杂，造价很高，从而限制了该技术的应用。

2.1.3 按需喷射法（DOD）

按需喷射法（drop－on－demand）是通过某种使能方式，由数字脉冲信号控制产生压力信号，从而挤压腔体产生一个微滴。根据使能方式的不同，可以分为压电晶体型、Bubble 型、电场控制型、热气驱动型、磁致伸缩型等等。

与其他类型的喷射方式相比，DOD 喷射系统有如下特征：

1）与控制信号同步，按需（on－demand）喷射液体；

2）短暂的压力脉冲通过弹性体的形变产生；

3）腔体内的液体通过液体的表面张力（毛细现象）来补充；

4）由液体的黏性阻力使系统恢复平衡态。

目前微驱动领域中主要采用的驱动方式有：热驱动、超磁致伸缩驱动、电磁驱动以及压电驱动等。

（1）热驱动

热驱动是利用热效应进行驱动。典型方式之一是双膜片式驱动。将两片不同材料的膜片粘接在一起，受热或冷却时，由于两种材料的热膨胀系数不同，膜片产生变形，从而使泵腔的体积发生变化，驱动流体运动。如图 6.8-5 所示是一种典型的热驱动泵的截面示意图。这种驱动方式不适用于微滴喷射技术，一是它的位移量很小，仅由材料的热变形差来取得；二是它靠膜片材料的热变形产生位移，响应速度慢，无法达到比较高的频率。

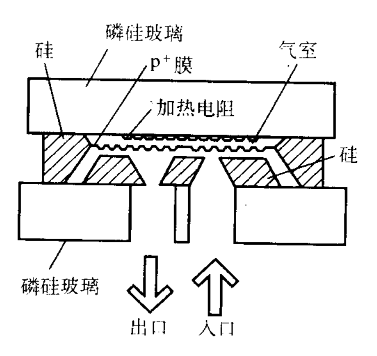


图 6.8-5 热驱动示意图

（2）电磁驱动

电磁驱动是研究相对较早而且较为成熟的一种驱动方式，在液体和气体流量的控制中得到广泛应用。它的原理是电磁线圈在交变电流作用下产生交变磁场，使衔铁往复运动，以此驱动振膜工作，形成喷射；或作为阀开关，控制微型阀开启关闭。电磁驱动的典型结构如图 6.8-6 所示。这种驱动结构，原理和结构简单，成本低廉，可以达到较大位移而且控制电压低。

高速电磁阀的优点是控制电路简单，使用电压低（10～30 V），喷射流量大，效率高。但也存在下列一些问题。

1）较高功率的高速电磁开关阀可以喷射的流体黏度范围较大（0～150 MPa·s），但由于其动作频率最高仅为 0.12 kHz，喷头每次打开，液体以连续射流的方式进行喷射，难以实现离散型精确控制。同时，在阀门关闭时，由于



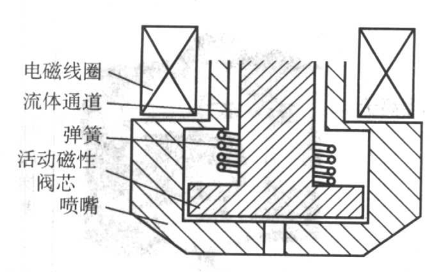


图 6.8-6　电磁式驱动示意图

阀门与喷嘴间存在一定的空腔，腔内的流体在惯性作用下会继续流出，关断响应速度低。另外由于其功耗大，当脉冲信号高电平为 24 V，频率为 0.1 kHz 时，线圈电流约为 1 A，工作中发热量大。此电磁阀对部件的加工精度要求高，导致成本高。

2）低功耗微型高速电磁阀使用的脉冲信号电压低，一般为 10 V 左右，频率最高为 0.4 kHz，液滴大小可以根据脉冲信号的脉宽来进行调节，能够实现数字化喷射和满足三维堆积对精度的要求。但是线圈电流只有 0.1 A，电磁力小，不能给流体施加很大的压力，导致喷射的黏度范围很低（0～1.5 MPa·s）。同时，其阀杆与阀体之间的间隙很小，对流体材料的清洁度要求很高，使用前后需要仔细清洗，否则会造成堵塞电磁阀。而且其阀杆浸泡在工作流体中，对阀杆的耐腐蚀性也提出了很高的要求。

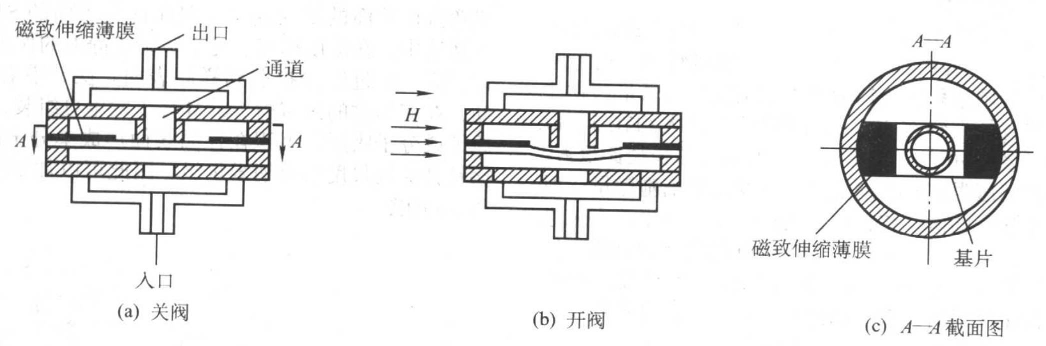
综合以上实验结果可以看出，使用高速电磁阀进行微滴喷射，喷射流体的黏度与能够达到的最高频率是一对矛盾，在实践中不易处理。

（3）超磁致伸缩驱动

超磁致收缩材料是一种新型的电（磁）-机械能转换材料（主要为三元稀土合金，如 TbxDy1－xFe2－y）。与压电材料相比，超磁致伸缩材料具有很多优点，如室温下应变大（是压电陶瓷的 5～8 倍），能量密度高（是压电陶瓷的 10～14 倍），响应速度快（达到 μs 级），输出力大（可达到 220～880 N）等。国外已将它应用于伺服阀，比例阀和微型泵等流体控制元件中，并取得了一些进展。

目前超磁致伸缩材料的应用方式主要分为两种。一种是薄膜材料，用多种镀膜法把超磁致伸缩材料镀在非磁性基片上，当有外加磁场时，薄膜就会产生变形，带动基片偏转或扭曲，从而达到驱动的目的。图 6.8-7 所示为德国 E. Quandt 等人设计的悬臂梁式磁致伸缩微型泵示意图。当阀门闭合时，通道口与镀有磁致伸缩薄膜的基片紧紧相接，当有外加磁场时，基片弯曲，通道口打开。

另一种是直接利用磁致伸缩棒的伸长或缩短来控制阀的开关。瑞典一家公司将超磁致伸缩棒 Terfenol－D 用于燃料注入阀。



(a) 关阀　(b) 开阀　(c) A—A 截面图

图 6.8-7　磁致伸缩驱动示意图

作者对棒式磁致伸缩材料作为阀的驱动元件进行了的实验研究，设计了如图 6.8-8 所示磁致伸缩棒式驱动器。线圈的主要作用是产生磁场控制磁致伸缩棒往复运动；执行棒是用来传递磁致伸缩棒的运动，控制阀门开闭；弹性体的作用是令执行棒迅速回复原位；导向筒的作用是对磁致伸缩棒的运动进行导向。

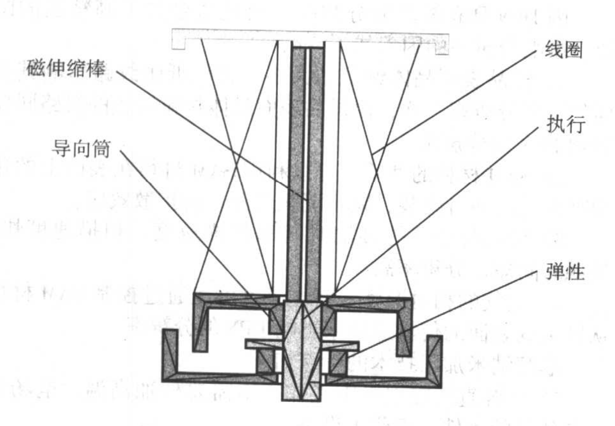


图 6.8-8　磁致伸缩棒驱动器示意图

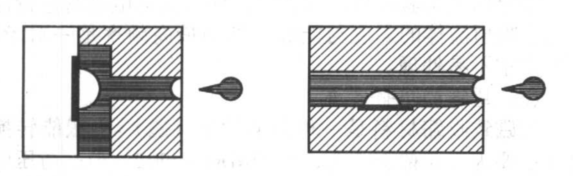
实验表明，棒式磁致伸缩材料相对于电磁式驱动而言，可以减少机械连接部件，使喷头结构更简单。但是要达到足够的位移量，所需要的棒材体积过于庞大，比如为达到 0.1 mm的位移量，需要 ϕ10 mm × 100 mm 的磁致伸缩棒，而驱动线圈的体积达到 ϕ70 mm × 127 mm，质量达到 10 kg 左右。同时磁致伸缩棒驱动器的驱动电流在 2～3 A 左右，耗能大，而且发热后本身的热效应会导致伸长量减小，不能满足数字微滴喷射装置小型化和稳定工作的要求。

（4）压电驱动

压电驱动是指利用压电元件的逆压电效应将电能转换为机械能。压电驱动的优点主要在于其单位体积输出能量大、结构紧凑、形式多样、无电磁干扰、可控性好并且生产工艺成熟、性能稳定、成本低等。目前在机器人动作器、精密仪器、微小机械的驱动机构中应用广泛，在微流量控制器中的应用研究也正受到很大重视。后面将详细介绍这种驱动方法。

（5）Bubble 型喷射方式

在微滴喷射技术中，Bubble 型是一种很重要的喷射方式。1979 年，Canon 公司的 Endo 和 Hara 发明了一种按需打印的喷墨方法。通过喷口附近的小加热器对微管道的液体加热，使起产生气泡，气泡的长大和破裂产生的压力将液滴挤出喷口。此原理的优点是结构简单，驱动信号简单，易于集成等。典型的结构由底喷和侧喷两种，如图 6.8-9 所示。


图 6.8-9 Bubble 型喷射方式

Bubble 型喷嘴可以利用溅射、刻蚀、真空蒸发等现有的半导体技术在硅片上加工，所以发展得很快。Bubble 型喷嘴上的加热电阻一般采用溅射的办法在 SiO_2 基底上沉积 H_fB_2，上面覆盖有保护层。电阻值一般在 90 Ω 左右。施加的脉冲信号一般小于 10 μs。当它加于电阻两端时，电阻温度急剧上升，使得液体表面温度也急剧上升（热流量可以达到 10^7 ~ 10^8 W/m²），并达到液体产生气泡的温度，此时液体的压力可以达到几个兆帕，气泡已经产生并开始急剧膨胀，产生的压力将液滴从喷嘴里喷出。

液滴的产生以及达到一定的飞行速度完全依赖于气泡的产生，气泡的产生时间以及大小与液体的黏度、喷嘴长度和信号脉冲有很大的关系。喷嘴越长，液体黏度越大，则气泡的最大体积越小，液滴的飞行速度也越小。

（6）细胞微量注射

南京理工大学的章维一等开发出一套细胞微量注射装置，将药液注入针尖内孔为 1 ~ 5 μm 的玻璃微针内，通过精确定位及微位移调整系统使针尖刺入细胞核进行微量药物注射。动物细胞直径大约在 20 μm，细胞核直径大约在 5 μm，要求药液分辨量在 10^{-8} μL 级。注射用玻璃针的长径比很大，注射时需较大的压强克服毛细阻力。开发出的细胞微量注射装置利用压电陶瓷的微位移特性，通过容积的微小改变来进行微量注射。注射量可以通过施加在压电陶瓷上的电压来控制，由于压电陶瓷电压与位移有很好的线性关系及复位性能，保证了微量注射时药液量的控制具有良好的可靠性和稳定性，真正意义上实现了细胞注射的定量控制。

（7）纳米喷流加工（NANOJET）

德国卡塞尔大学的 J. Voigt 等人提出一种采用扫描微喷嘴技术的微细加工方法——纳米喷流加工（NANOJET）。该技术通过微波源产生高密度的等离子体，由纳米喷嘴将其引入到样品表面，实现了纳米尺度的局域刻蚀。图 6.8-10 为 NANOJET 的原理示意图。电中性的反应活性基团由微波源产生，在气压梯度（因等离子体源和工作腔之间的气体压力不同，在导管内形成了如图 6.8-10 中所示方向向下的气压梯度）的作用下，沿导管经纳米尺度直径的喷嘴引出，形成极细的粒子束流投射在样品表面，实现局域选择性刻蚀。当以纳米喷嘴作为 AFM 探针针尖工作，则可以对表面形貌进行成像。

NANOJET 的特点如下。

1）刻蚀速率较高，可加工材料广泛。在引出的粒子束流中，离子浓度因传输过程中的复合效应而显著降低，反应活性基团则寿命较长而且保持较高的浓度，且能量低。因此是纯化学刻蚀，刻蚀选择性好、速率高，避免了表面材料的晶格损伤。

2）设备简单，加工精度较高。采用高纵横比的微喷嘴，引出粒子束流方向性好；采用纳米尺度的微喷嘴可以刻蚀高精度的图形。

3）加工精度与表面质量无关，喷嘴寿命高。由于是非接触式加工，因此对被加工材料的表面状况不敏感，可以避免因接触带来的喷嘴尖端磨损，有利于提高喷嘴寿命。

4）刻蚀图形的线宽与刻蚀时间有关。

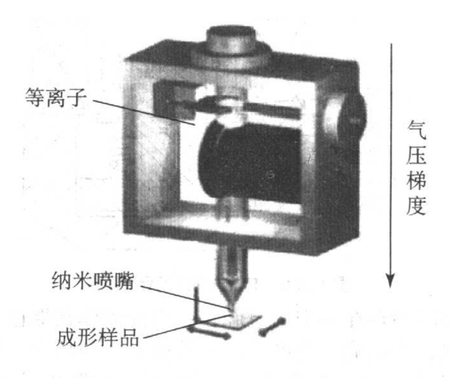


图 6.8-10 等离子产生和工作原理示意图

2.2 蘸笔直写微输运方法

美国西北大学 Mirkin 小组首先提出了蘸水笔纳米加工技术 DPN（dip-pen nanolithography），实现样品表面高精度图形的直接加工。DPN 利用原子力显微镜 AFM 探针将 SAM（self assembly monolayer）材料涂覆在样品表面，得到单分子层的沉积图形。图 6.8-11 表示了 DPN 的加工原理图。操作前，通过浸入 SAM 溶液或蒸发镀膜的方法在探针表面上涂覆一层 SAM 薄膜。工作时，探针针尖与样品表面接触，因空气湿度影响，在毛细管效应的作用下，针尖和样品表面之间形成弯月形液面的微液滴。涂覆在针尖表面的 SAM 材料溶解在液滴中，在浓度梯度、化学吸附或静电的作用下，沿着探针表面，通过针尖扩散到样品表面。探针沿着样品表面运动，在扫描过的区域内，SAM 分子发生自组装，并被表面的原子或分子吸附，沉积在样品表面形成单分子层薄膜图形。探针针尖的尺度小至纳米量级，因此可以加工线宽小到 5 ~ 10 nm 的图形。

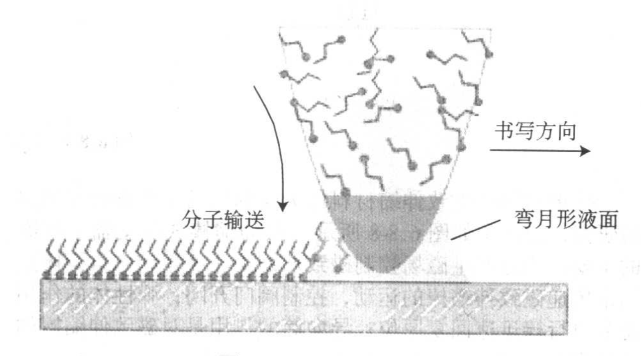


图 6.8-11 DPN 加工原理

因 DPN 具有较高的分辨率，因此适合加工高精度的图形，影响分辨率的因素如下。

1）样品表面晶体颗粒的大小。类似纸张纹路影响其上面的文字分辨率一样，由样品表面晶体颗粒构成的纹路同样影响 DPN 的分辨率。

2）SAM 材料的性质。可以利用 SAM 材料在表面上的化学吸附效应和自组装，减小沉积后图形的扩散效应。

3）针尖与表面的接触时间和扫描速度。扫描速度快，接触时间短，分辨率高。

4）空气的相对湿度。空气湿度可能通过控制 SAM 材料从针尖到表面的传输速率来影响 DPN 的分辨率。

蘸笔纳米加工技术的特点如下。

1）DPN 直接在空气中工作，不需要外加高温、电场和真空环境的条件，简化了设备。

2）可加工多复合层图形。多次扫描加工，可得到含有多种材料的复合层图形。

3）采用微系统加工技术得到 DPN 探针阵列，可实现并

行加工，提高了加工效率。

然而，这种 DPN 存在一个明显的缺点，就是只能把有机分子“写”在基底图上，保持所生成结构的长期稳定性是一个重要问题。杜克大学化学系李彦等发明了电化学 AFM “Dip - Pen”的纳米加工技术（简称为 E - DPN），如图 6.8-12 所示，针尖与基底间的水层作为溶有金属盐的电化学池，通过加以一定大小的直流电压让金属盐在该电化学池中被还原，随后还原产物沉积到基底上，和前者比较优越性在于：一方面提高了结构的热稳定性和多样性；另一方面是能够以更高的位置及形状可控性加工金属、半导体纳米结构。可以形成线宽为 50 nm 的金属线。

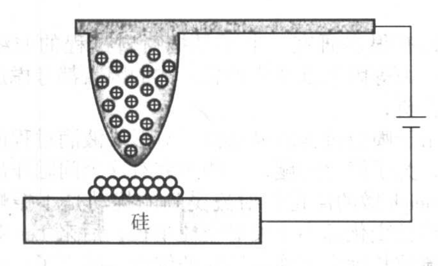
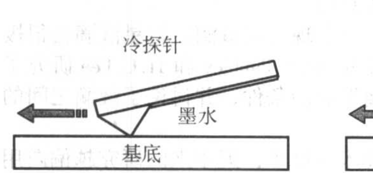


图 6.8-12　E - DPN 加工原理

乔治亚州技术学院和美国海军研究实验室联合开发了热“Dip - Pen”的纳米加工技术（简称为 tDPN），如图 6.8-13 所示。DPN 技术将有机分子涂敷在探针上，一旦探针针尖与基底接触，有机分子就源源不断的流向基底，直到探针针尖离开样品表面。整个直写过程不能控制有机分子流的开启与关断。tDPN 技术采用特制的内含加热器的探针和容易融化的固体墨水来实现分子流的开启与关断。一旦探针加热，固体墨水融化就可以开始进行直写；这种技术停止探针加热，通过自然冷却，墨水固化就可以停止直写。可以形成 95 nm 的线宽。



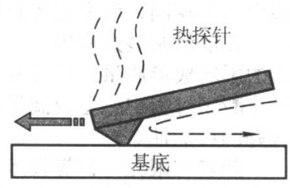


图 6.8-13　tDPN 加工原理

目前 DPN 已经能够在金属、半导体、绝缘材料的表面上进行淀积加工。美国西北大学 Mirkin 小组利用双探针阵列可以在金薄膜上直写十八烷硫醇 1 - ODT（octade anethiol），在刻写速度为 0.5 μm/s 时，得到图形的最小线宽为 60 nm。图 6.8-14 为硫基十六烷酸在金膜上直写的高分辨率字母，线宽小到 10 ~ 15 nm，间距为 5 nm。采用 DPN 成功技术构建具有 100 nm 微尺寸特征的蛋白质阵列并用原子力显微镜进行了检测。研究表明，蛋白质直接沉积比间接沉积具有更多优点：节省时间、制作简单，更重要的是保持更多蛋白特性。

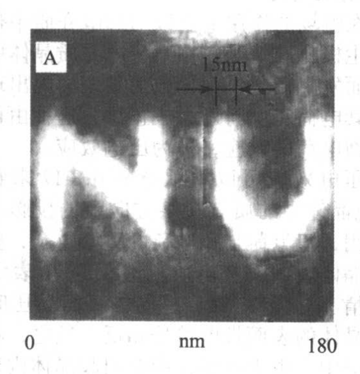
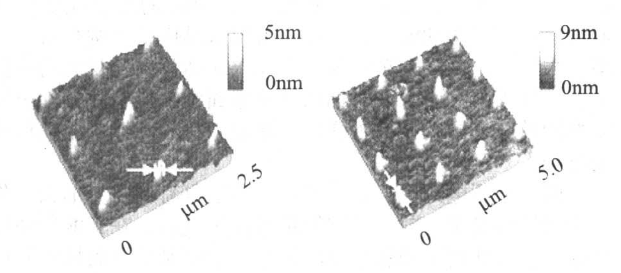
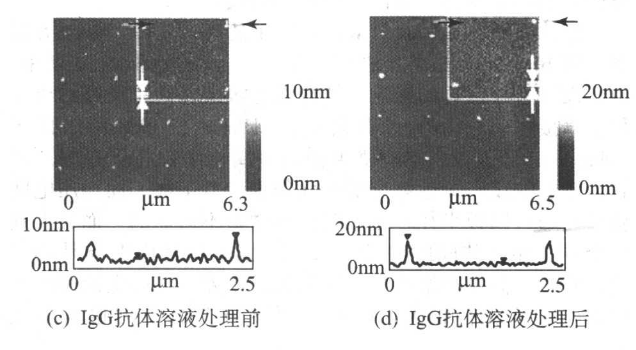


图 6.8-14　纳米字母

国内吉林大学化学学院魏莉等也采用 Dip - Pen 刻蚀技术直接制造出 2 × 2 的 BSA（牛血清白蛋白）阵列，每个图形大小为 500 × 500 nm，如图 6.8-15 所示。



(a) 溶菌酶纳米点阵列AFM图像　(b) IgG纳米点阵列AFM图像



(c) IgG抗体溶液处理前　(d) IgG抗体溶液处理后

图 6.8-15　纳米蛋白质阵列

杜克大学化学系李彦等采用 E - DPN 方法在硅表面直接书写线宽度低于 50 nm 的多种金属和半导体组成的纳米结构。图 6.8-16 是在硅表面上写的 50 nm 的金属铂线 AFM 图，铂线高度为 0.4 nm。环境相对湿度 40%，电压 4 V、书写速度 5 nm/s。

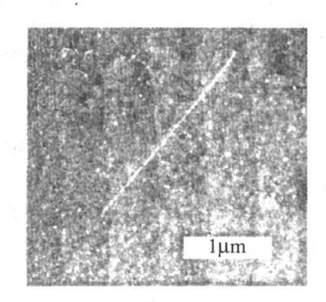


图 6.8-16　E - DPN 书写纳米铂线

国内吉林大学化学学院洪霞、魏莉等以牛血清蛋白（BSA）自组装膜为基底，利用 DPN 技术直接构建 Fe_3O_4 磁性纳米微粒，制作出磁性十字图形。十字的平均线宽为 55 nm，纳米阵列的区域为 1 μm × 1 μm。

2.3　国内外在微输运技术方面的其他相关研究工作

微输运技术的研究方向主要包括：驱动器的设计与优化研究、腔体内部液体压力变化的过程模拟，以及液流断裂、最终形成液滴过程的研究。

驱动技术方面，压电器件自上世纪 80 年代以来，开始得到广泛应用。基于压电的驱动器件的理论研究一直在进行，至今方兴未艾。对于压电驱动器的优化设计，由于牵涉到材料特性、机电耦合等问题，至今没有得到很好的解决。

对于单（双）晶体片类型的压电驱动器，相对而言，其力-位移模型比较简单，已经有比较成熟的计算方法。

1991年，Smits提出了压电双晶体片的静态本构方程，并对动态特性进行分析，他研究的双晶体片结构是两块晶体片直接粘接在一起，没有考虑中间弹性梁。针对有夹层的情况，杜立群等人利用Dimitials假设和Fuller的线性应变分布假设，以相对驱动能力为目标，得出双晶体的结构分布力模型。大连理工大学李东明等人，在双晶体片结构受力的情况下，推导了弹性面双面对称粘贴和单面粘贴压电片驱动位移模型的计算公式，分析了弹性梁厚度和材料特性对驱动位移的影响。

圆片型压电陶瓷-金属复合体由于具有体积变形大，作为两层结构易于密封，结构简单轻便等优点，在工业中使用最多。多层薄板振动理论比较复杂，中间又牵涉到压电陶瓷的压电效应，是一个很复杂的机电耦合问题，对圆片型压电陶瓷-金属复合体一直没有很好的解决。

1973年，Denkmann，W，J.，在忽略了所有耦合情况下，用Rayleigh-Ritz方法求出了近似解和近似共振频率。由于没有考虑耦合的影响，结构误差很大，而且没有给出工程上直接计算能用的计算公式。Adelman在1980年给出了Unimorph（即假设压电陶瓷半径与金属板半径相等）的严格解，它选取没有惯性耦合的平面作为参考平面，而当压电陶瓷半径与金属板半径不相等时这样做是不可能的。而且上述两个方法存在共同的问题，即假设压电陶瓷内电场是均匀的，而这一假设将给结果带来较大的误差。实际上沿厚度方向的电场变化得很大，因此沿厚度方向的应力也是变化的。

1984年，中科院声学所穆廷荣考虑了厚度方向的电场变化，分析了电压驱动的由半径不同的压电陶瓷和金属板构成的两层复合薄圆板的强迫振动，给出了简支边界条件和固定边界条件下的严格解，讨论了几何参数对机电性能的影响。

上述研究结论都没有考虑电场的边缘效应，而且由于当时的研究目的在于使用压电陶瓷-金属复合板做换能器，侧重提高其机电性能，对平板的位移曲线以及几何参数对体积变化的影响等结论考虑甚少，而这些结论对压电喷射装置的设计非常重要。

20世纪90年代末微小泵研究兴起，微小泵经常使用压电陶瓷-金属复合板作为驱动器，学术界再次关注压电陶瓷-金属复合板的研究。清华大学力学系罗小兵用能量法计算，压电驱动装置使用的压电陶瓷-金属复合体时，假定了压电陶瓷的位移曲线，并利用能量法求出多项式的表达式。

实际上，工程上更多采用经验选择，试验验证的方法，吉林工业大学程光明、日本山形大学的铃木胜义等人对压电泵的工作原理进行初步的分析，对压电泵的流量进行了测试，得出了压电驱动器的体积变化量的经验公式，由于压电驱动器的变形量比较微小，上述方法不可避免地存在误差，而且上述经验公式没有能够反映压电驱动器的各种材料参数、尺寸对其体积变化的影响，不能够对压电驱动器的优化设计进行指导。

微滴喷射技术的实现方法多种多样，对于过程模拟多是针对具体的结构和驱动方式，讨论的方法往往不具有普遍适用性。

1979年，Stemme介绍了压电毛细管喷头在墨滴产生中的应用，全面介绍了压电毛细管喷头的原理。

1981年，Edmod L.Kyser等人发表了一篇经典文献，“Designed of an impulse ink jet”，针对了单晶体片类型压电驱动器，腔体结构也为一维管状的喷墨打印头比较简单的情况的设计方法，在文中，建立了打印头的数学模型，根据其数学模型可以计算出喷射液滴的速度、流量等。

1983年，IBM公司的Heinz Gerhauser等人研究了波形对按需喷射装置喷射效果的影响。

液滴的形成过程机理研究的人较多，目前已经形成了专门的一个领域。

最早是1878年Lord Rayleigh分析了理想（不可压缩）非黏滞性流体喷射的稳定性的问题；后来，他和C.Weber讨论了黏滞性理想流体稳定性的问题；Rayleigh讨论了液滴束流的频率、液滴尺寸、两股液滴束流的碰撞，液滴充电、液滴含尘对液流束流的影响等问题，他是液滴束流理论的奠基人。

后来还有很多研究，主要是把喷射过程的非线性、黏度、环境压力等因素以及非理想流体的因素都考虑进去，做出了一些分析；

但是由于喷射过程的复杂性，对形成液滴过程的理论没有完备解，为了简化问题，一些研究对这个问题作出了各种假设：Rayleigh做的简化是射流受到的扰动是小振幅，并且喷射液流半径变化远小于喷射液柱半径；后来Lee对喷射过程做了射流波长远大于液流半径的假设，建立了一维液流的断裂模型；

20世纪70~80年代，由于喷墨打印机的发展，为了提高打印质量，对液流断裂过程的研究又热了起来。由于计算科学的发展，这些研究主要集中在用有限差分方法来计算液流断裂过程，在计算机上模拟液流断裂的形态。

1979年，Bogy发表了“Drop Formation in a Circular Liquid Jet”的文章，用数学模型描述了一维液体喷头中液滴产生过程，1980年，他又发表了“Finite Difference Solution of the Cosserat Fluid Equations”介绍了有关的有限差分解法。

其他学者，如Adams等人也对一维液体喷头中的液滴产生过程建立了自己的数学模型。由于这些学者所作的简化和假设各不相同，研究也各具特色。

在液流断裂过程中，会出现行星液滴，行星液滴会很极大的影响成形质量。1977年W.T.Pimbley和H.C.Lee研究了液流断裂过程中行星液滴形成的条件，并讨论了液滴之间的合并的可能性。

随着有限元与计算技术的进步，近年来的研究越偏向用有限元或者有限差分的方法进行数值计算，并在计算机上对液滴喷射的过程进行模拟。

T.W.Sheld等人运用有限差分法对一维液体模型进行了模拟，解释weber数对液滴形成过程的影响。

3 基于压电晶体的微滴喷射技术研究

3.1 基于压电晶体的微滴喷射原理

3.1.1 晶体的压电性

通常，在电场的作用下可以引起电介质中带电粒子的相对位移而发生极化。但是，在某些电介质晶体中也可以通过纯机械作用而发生极化，并导致两端表面内出现符号相反的束缚电荷，其电荷密度与外力成正比，这种由机械力作用而激起晶体表面电荷的效应，称为压电效应。

晶体的压电效应可以用示意图6.8-17来解释。图6.8-17a表示压电晶体中的质点在某方向上的投影。此时，晶体不受外力作用，正电荷与负电荷的重心重合，整个晶体的总电矩为零，晶体表面不带电荷。图6.8-17b表示晶体表面受拉时的电荷情况。图6.8-17c是晶体表面受压时的情况。两种情况下，晶体的表面带电符号相反。反之，将一块压电晶体置于外电场中，由于电场作用会引起晶体内部正负电荷重心的位移，这一极化位移又会导致晶体发生形变，这个效应



称为逆压电效应。

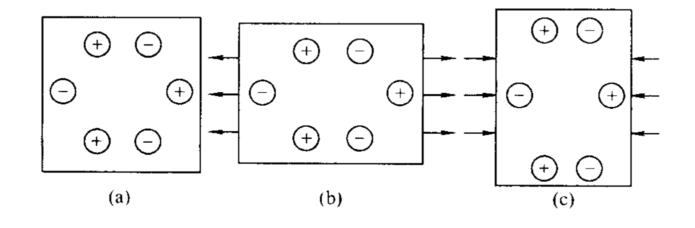


图 6.8-17　晶体压电效应示意图

由此可知，压电效应是由于晶体在机械力的作用下发生形变而引起带电粒子产生相对位移，从而使晶体的总电矩发生变化而造成的。具有对称中心的晶体永远不可能具有压电性，因为在这样的晶体中，正负电荷的中心对称式排列不会因为形变发生不对称的相对位移，也就不能产生极化。换言之，晶体必须具有极轴，才有压电性。

铁电晶体在居里点以下必然是极性晶体，不具有对称中心，因此具有压电性，所以 PZT（锆钛酸铅）等钛电体能够作为压电材料用于微致动器领域。

3.1.2　压电方程

压电材料的压电方程

$$\begin{cases} S_1 = S_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \end{cases} \qquad (6.8\text{-}1)$$

式中，下标 1、3 分别代表 x、z 方向；S_1、T_1 分别是 x 方向的应变和应力；E_3 和 D_3 分别是 z 方向的应变和应力；ε_{33}^T为外应力为零或者恒定时的介电常数；d_{31} 为压电常数。

3.1.3　压电材料的几个重要参数以及材料选择

描述晶体材料的弹性、压电、介电性质的重要参数，除了上面谈到的介电常数，弹性模量和压电常数之外，还有描述脚边电场中的介电行为的介质损耗角正切 $\tan\delta$，描述弹性谐振的力学性能的机械品质因数 Q_m 以及描述谐振时的机械能和电能相互转换的机电耦合系数 k 等。

（1）介质损耗

电介质晶体在外电场作用下的极化包括电子云极化、离子极化和取向极化。取向极化会使得电介质突然受到静电场作用时，往往要经过一段时间极化强度才能达到最终值，即极化驰豫现象。如果介质受交变电场作用，而交变电场变化时相当迅速的时候，极化就会追随不及而滞后，从而成为介电损耗的原因之一。介质漏电是介电损耗的另一个原因，特别是高温和强电场的作用下。

通常以电介质中存在一个损耗电阻 R_n 来表示电能的损耗。这样，就把通过介质电流分成消耗能量的部分 I_R 和不消耗能量部分 I_c。定义介质损耗角正切为

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_c} = \frac{1}{\omega C R_n} \qquad (6.8\text{-}2)$$

式中，ω 代表交变电场的角频率，C 就是带有电极的介质样品的静电容值。因为 $\tan\delta$ 与介质损耗的能量成正比，往往把 $\tan\delta$ 成为损耗因子。显然，介质损耗越大，材料的性能越差。所以，介质损耗是辨别材料性能好坏，选择材料和器件的重要依据。

（2）机械品质因数

由于压电体具有压电效应，当对一个按照一定取向和形状制成的有电极的压电晶体输入电信号的时候，如果信号频率与晶体的机械谐振频率 f_r 一致，就会时晶体由于逆压电效应产生机械谐振。晶体的机械谐振又可以因为正压电效应而输出信号，这种晶体常成为压电振子。压电振子谐振时，要克服内摩擦而消耗能量，造成机械损耗。机械品质因数 Q_m 反应了在谐振时的损耗程度。Q_m 定义为

$$Q_m = 1/[4\pi(C_0 + C_1)R_1\Delta f] \qquad (6.8\text{-}3)$$

式中，C_0 振子的静电容；R_1 为振子谐振时候的等效电阻；C_1 为振子谐振时候的等效电容；Δf 时振子的谐振频率 f_r 与反谐振频率 f_n 之差。

（3）机电耦合系数

机电耦合系数 k 反映了压电材料的机械能和电能之间的耦合关系，是压电材料一个很重要的参数，它的定义为

k^2 = 通过逆压电效应转换的机械能/储入的电能总量

或者 k^2 = 通过压电效应转换的电能/储入的机械能总量

由于压电振子的机械能与振子的形状和振动模式有关，对于不同的模式有不同的耦合系数；k_0 代表薄圆片径向伸缩模式，k_{31}代表薄长片长度伸缩模式，k_{23}代表圆柱体轴向伸缩模式等等，机电耦合系数量纲为 1。

此外，压电材料还有其他重要的参数，包括频率常数、声阻抗，以及各项参数的稳定性，读者可以参阅相关专著。

（4）压电材料的选择

压电材料本身具有很多优良品质，作为压电材料的重要应用领域，基于压电原理的微机械研究今年来越来越引起广泛的关注和研究。由于压电材料可以直接将机械信号转换为电信号，可以制成各种用途的传感器。同样，压电材料还可以将电压信号直接转变为材料应力，产生物理变形。基于这一特性，压电材料也是制作微执行器的合适材料。

选择何种压电材料主要从应用的角度出发，不同用途的压电材料对上述三种重要参数有不同的要求。例如，在超高频和高频器件中使用的材料，要求介电常数 ε 和高频介质损耗 $\tan\delta$ 要小；用作换能器材料，要求机电耦合系数 k 要大，声阻抗匹配好；用作标准频率振子，则要求稳定性高，机械品质因数 Q_m 值高；用作延迟线材料，除了稳定性好之外，还要考虑声传播速度；用作电声材料，则要求介电常数 ε 高，机电耦合系数 k 要大，弹性模量 v 小，而介质损耗 $\tan\delta$ 大一些没有关系；对于滤波器材料，要求经时稳定性和温度稳定性要好，同时，希望机械品质因数 Q_m 值高，介质损耗 $\tan\delta$ 小，机电耦合系数 k 则根据滤波器的带宽要求而定。

作为致动器，要求压电材料具有较高的介电常数 ε 和较高的机电耦合系数 k 压电常数，在电场强度的情况下，要求具有小的介质损耗 $\tan\delta$ 和大的机械品质因数 Q_m。极化的压电陶瓷材料具有良好的压电性能，它满足上述的机械品质因数，因此被广泛用作微型致动器。

3.2　压电驱动微滴喷射装置设计

3.2.1　压电驱动微滴喷射装置系统结构分析

根据试验观察可以把一个微滴的喷射过程分为四个阶段，如图 6.8-18 所示。

（a）腔体内部液体处于平衡态，喷孔处液面内凹成新月形；

（b）压电晶体在电压脉冲作用下产生形变，挤压腔体内部的液体；

（c）喷孔处压力到达最大值，喷嘴内部一粒液滴喷出；

（d）压电晶体恢复原来的形状，腔体内部产生负压，补充液体，喷孔处液面内凹成新月形。



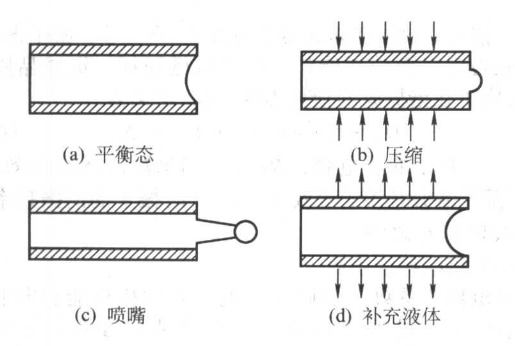


图 6.8-18 微滴喷射技术的四个阶段

从功能上分析，微滴喷射装置应该具有材料供给、动力源、材料暂存、材料输出等四个主要部分。如图 6.8-19 所示。

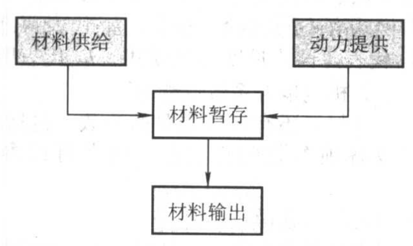


图 6.8-19 微滴喷射装置的功能要求

按照具体的部件，压电驱动微滴喷射装置包括供液系统、喷头、高压信号发生器、控制器等四部分。这四个部分的功能如下。

1）供液系统　提供喷射所需的液体。实验表明，供液系统的液面保持恒定，喷头能够得到稳定的液体补充，是形成稳定喷射的前提；

2）喷头　喷头的功能为液体暂存，并提供压力脉冲，将腔体内的液体喷射出去；

3）高压信号发生器　提供高压脉冲信号，驱动压电驱动器，产生压力脉冲；

4）控制器　接受上位机的指令，并对供液系统的液面状态和喷头状态进行监测，控制高压信号发生器的幅值、频率、占空比等参数。

这 4 个部件相互的信号流如图 6.8-20 所示。

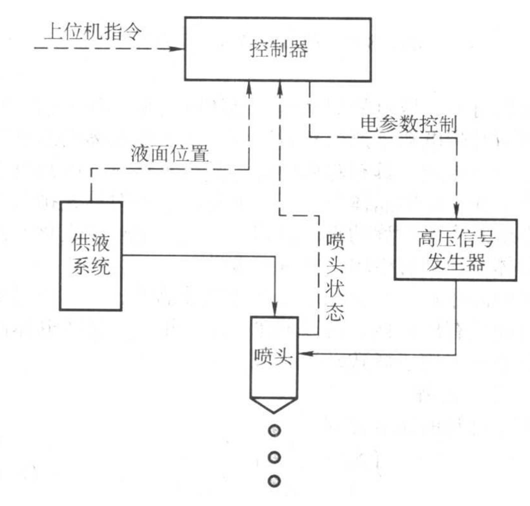
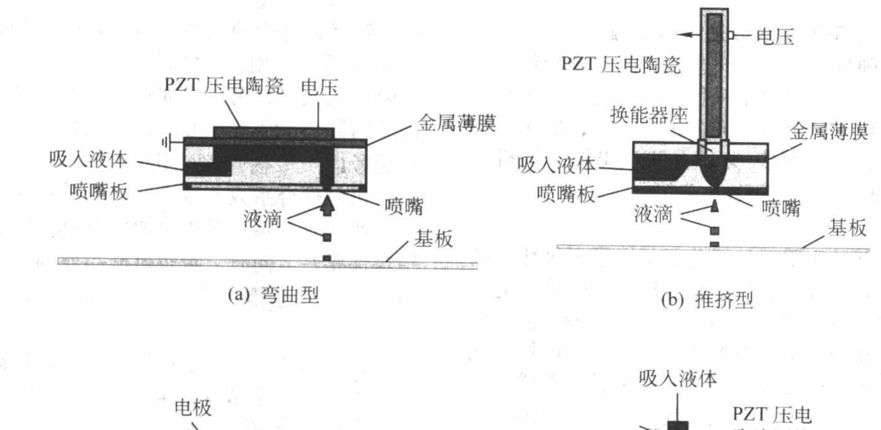


图 6.8-20 微滴喷射系统示意图

利用压电材料的逆压电效应，有各种类型的压电驱动器。目前实际应用的形式如图 6.8-21 所示。



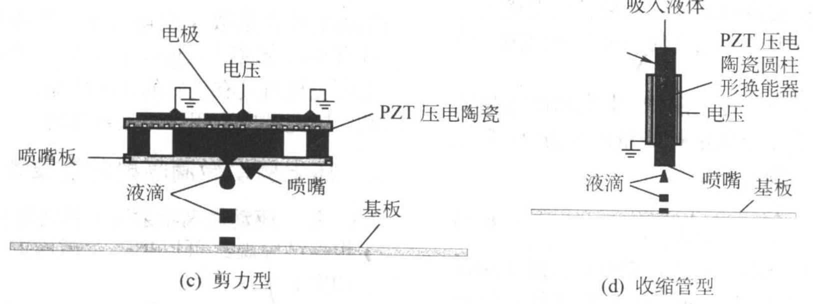


图 6.8-21 压电晶体喷射方式

图 6.8-21a 为弯曲型压电晶体喷射方式。驱动部分为金属薄膜-压电陶瓷复合体。压电陶瓷在径向的形变导致金属薄膜在薄膜法向方向的位移，从而改变流体容腔的体积，将流体从喷嘴中喷射出去。图 6.8-21b 为推挤型的喷射方式，其直接利用压电晶体的形变改变流体容腔体积完成喷射。图 6.8-21c 为剪力型喷射方式。当压电晶体的极化方向和施加的电场方向垂直时，压电晶体将产生剪应变。利用这个原理可以制成剪力型的喷射装置，如图 6.8-22 所示。这种方法很容易制造成集成度较高的阵列喷头。图 6.8-21d 所示的为收缩管型喷射方式，主要由玻璃管内径、压电管和外封装三部分组成。其优点是收缩管型压电喷头结构简单，加工方便，易于小型化，喷管采用玻璃易于消毒不怕腐蚀，适合生

物材料的喷射。

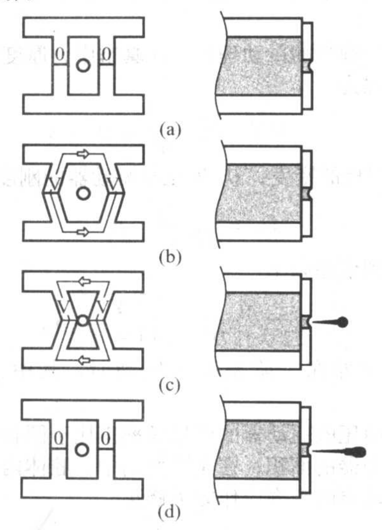


图 6.8-22　剪力型压电喷射原理

由于压电陶瓷 - 金属复合体具有体积变形大、制作简单等优点，本文以其为重点具体分析，研究其设计和制造方法，并讨论喷射质量的控制。这些原理可以应用于其他类型的压电晶体喷射方法中。

3.2.2　压电驱动微滴喷射装置的设计准则

压电驱动器的基本形式已经由所选定的驱动方式所决定，即圆片薄膜式结构，由压电陶瓷片和金属膜片粘接而成。试验中选用 PZT - 5 作为陶瓷材料。改性的 PZT（锆钛酸铅）陶瓷是目前用作微位移器最多的压电陶瓷，其中 PZT - 5 的特点是 Q_m 很低，K_p 大，D_{33} 中等，应变量较大，在 90 kV/cm 下可产生 0.6% 的应变量。低电压时，其应变和电场基本上成线性关系，性能稳定。同时在使用逆压电效应的元器件生产中应用最广泛，工艺成熟，品质稳定。金属薄膜材料选择黄铜，一是黄铜耐腐蚀性好，二是在常用金属中弹性模量小，易于弯曲。

在驱动器设计上有两种基本结构：单晶片式和双晶片式。单晶片式结构如图 6.8-23 所示。这种结构最简单，加工工艺也简单，并且工业上大量生产用作蜂鸣器驱动，来源广泛。双晶片式是由两片压电陶瓷与一片金属粘接而成，结构如图 6.8-24 所示，中间金属片作一级，两边陶瓷片并联作一级。相对于单晶片式，双晶片式驱动器在相同电场下，把两面压电陶瓷的变形量相叠加，因此能够产生更大的位移量，如长 30 mm，厚 0.5 mm 的双晶片能产生 200 μm 的位移量，将近为单晶片的两倍。但是双晶片用于微滴喷射中，还要考虑液体导电性，对双晶片另加一层厚度约为 0.1 mm 的绝缘层保护，因此位移量在一定程度上有所损失。

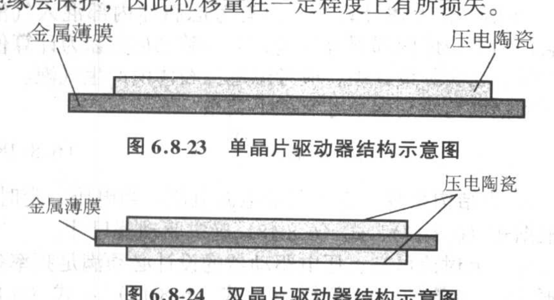


图 6.8-23　单晶片驱动器结构示意图

图 6.8-24　双晶片驱动器结构示意图

根据压电驱动微滴喷射装置的工作原理可知，微滴的形成主要取决于压电驱动器的形变所造成腔体内部的压力波动。工作时，腔体内部的液体被压电驱动器的振动所加速，当压力波动大于喷孔处的液体表面张力，一滴液滴就会喷射出去。

压电驱动微滴喷射装置设计的难点在于：压电驱动器工作时的振动位移非常小，一般只有几个 μm。如何合理有效地利用如此微小的位移来产生尽可能大的压力波动，是一个很大的难题；另一方面，由于液滴的质量非常小，容易受到各种因素的影响，也必须在设计中加以仔细考虑。

从设计的角度出发，对微滴喷射产生影响的设计参数很多，包括压电驱动器的参数（压电膜片和金属膜片各自的直径、厚度、材料）、腔体参数（形式、深度、直径）、入口参数（形式、直径、长度）、喷嘴参数（形式、直径、长度）、驱动电源参数（波形、频率、幅值、占空比），这些设计参数对是否形成喷射的影响程度是不一样的。

目前压电驱动微滴喷射装置的设计方法和准则研究还比较少，公开的文献大多致力于压电驱动器结构的研究，没有试图去分析设计参数与形成喷射之间的因果关系，大多数研究是采用定性的设计方法，想象微滴喷射装置的模型，然后通过实验研究，再修改设计，但是由于设计参数众多，这种方法费时费力，效果不好。

本文从分析微滴喷射形成的判据入手，分析微滴的形成条件，找出喷射与设计之间的解析关系，并根据提出的典型压电驱动喷射装置结构模型，推导出压电驱动微滴喷射装置的一般设计方法和准则。下面首先分析一下微滴形成的条件。

图 6.8-25 为一个典型的压电驱动微滴喷射装置，由压电驱动器（由金属薄膜和压电陶瓷膜片粘接在一起组成）、腔体、入口、喷嘴几部分组成（由于腔体内外都受到大气压力的作用，所以在分析时可以不考虑大气压力的作用）。

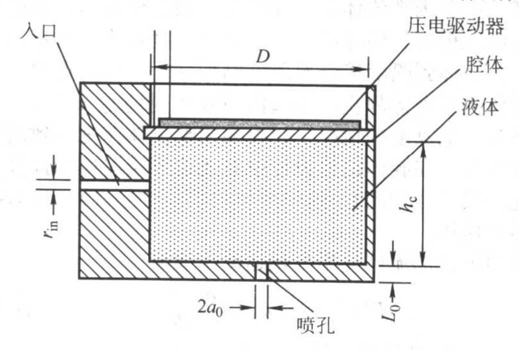


图 6.8-25　典型压电驱动微滴喷射装置

如图 6.8-26 所示为微滴喷射装置在不同时刻的喷嘴液面位置，当腔体内部液体压力 $p(t)$ 上升时，喷嘴处液体被加速到 $z(t)$，液体会形成一个球冠，然后喷射出去。在 t_0 时刻，液面处于平衡态，液面内凹；当内部有压力产生时，液面外凸，在 $t=t^*$ 时刻，液面外凸最大，成半球形；在 $t>t^*$ 时刻，液滴喷射出。

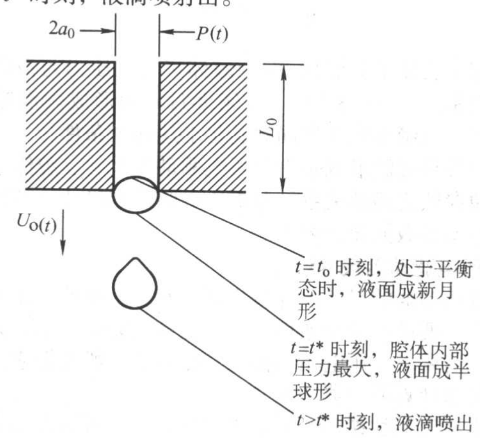


图 6.8-26　不同时刻喷嘴液面位置示意图



由此可见在微滴形成需要满足两个条件：

1）腔体内部液体需要克服液面表面张力的作用；

2）喷射液滴的体积大于一个液滴的体积。

由于表面张力在 $t = t^*$ 时刻最大，此刻腔体压力为

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{a_0}$$

式中，a_0 中为喷嘴半径。

如果忽略喷嘴内壁的黏滞力的作用，液滴从喷嘴喷射，需要满足

$$\frac{1}{2}\rho U_o^2(t^*) > \frac{2\sigma}{a_0} \quad (6.8\text{-}4)$$

式中，ρ 为喷射液体的密度；σ 为液体表面张力系数；$U_o(t)$为液体轴向速度。即

$$U_o(t^*) > \sqrt{\frac{4\sigma}{\rho a_0}} \quad (6.8\text{-}5)$$

可以得到

$$We = \frac{\rho U_o^2(t^*)a_0}{\sigma} > 4 \quad (6.8\text{-}6)$$

式中，We 为韦伯数，表征着液体惯量与表面张力之比，式(6.8-6)为微滴形成的第一个判据。

由第二个条件可以得到

$$\text{喷射微滴的体积 } V_{eject} = \int_0^{t^*} U_o(t)\pi a_0^2\,dt \geqslant \text{一个液滴的体积}\frac{4}{3}\pi a_0^3 \quad (6.8\text{-}7)$$

考察腔体内部流体的运动情况，根据对腔体内部流体运动的有限元模拟，腔体内部流体运动速度很小，喷嘴内速度较高，从腔体到喷嘴接合部速度剧烈变化。作为近似，可以认为腔体内部液体静止，喷嘴内速度相同均为 $z(t)$（在喷射液体为中低黏度的情况下，喷嘴内部流体速度一致时它符合实际情况，在腔体结构设计中有关边界层厚度的计算可以证明此假设是合理的）。这样腔体内部压力 $p(t)$ 只对喷嘴内流体起作用。

对喷嘴内部流体使用牛顿运动定律有

$$F(t) = \rho\pi a_0^2 L_0 \frac{dU_o(t)}{dt} \quad (6.8\text{-}8)$$

式中，L_0 为喷嘴长度。所以液体内部压力

$$p(t) = \rho L_0 \frac{dU_o(t)}{dt} \quad (6.8\text{-}9)$$

再假设加速过程中，腔体内部液体压力恒定，则

$$U_o(t) = \frac{p}{\rho L_0}t \quad (6.8\text{-}10)$$

根据式（6.8-7）、式（6.8-8）、式（6.8-10）可以得到判据 2

$$We \geqslant \frac{8}{3}\frac{pa_0^2}{\sigma L_0} \quad (6.8\text{-}11)$$

判据 2 表征了韦伯数 We 与腔体尺寸、压力与液体性质之间的关系。式（6.8-6）、式（6.8-11）为形成微滴喷射的两个判据。微滴形成必须同时满足上述两个条件。

下面推导微滴形成条件与压电驱动器尺寸、腔体结构参数、电源参数之间的关系、分析压电驱动器尺寸、腔体结构参数、电源参数的设计要求。

3.2.3 压电驱动器尺寸设计

压电驱动器的尺寸设计包括直径和厚度设计。压电驱动器的尺寸需要满足两个条件，一个是谐振频率要求，另一个是振动幅度要求。压电驱动器的谐振频率一般根据应用要求选定，再来计算驱动器的尺寸。

由于压电驱动器的厚度远小于其直径，可以将压电驱动器简化为均匀厚度的圆形薄板，等效圆形薄板厚度 t 等于压电驱动器的总厚度，等效圆板的密度 ρ、弹性模量 Y、泊松比 ν、直径 D 可取金属板和压电陶瓷相应尺寸的平均值。

则根据薄圆板的振动理论，在真空中，厚度方向的振动位移差分方程为

$$\nabla^4\xi + \frac{\rho}{D_p}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} = 0 \quad (6.8\text{-}12)$$

式中，ρ 为圆板的密度，D_p 为压电驱动器的刚度，并且

$$D_p = \frac{Et^2}{12(1-\nu^2)} \quad (6.8\text{-}13)$$

可以得到谐振频率

$$f_a = \frac{\pi t}{2\sqrt{12}D^2}\sqrt{\frac{Y}{\rho(1-\sigma^2)}}\beta_{mn}^2 \quad (6.8\text{-}14)$$

压电驱动器在一阶基频下振动时，其中 $\beta_{mn} = \beta_{01} = 1.015$。

上式说明压电驱动器的谐振频率正比于圆板厚度 h，反比于压电驱动器的面积；在实际使用中，腔体内部充满液体时，压电驱动器的频率应作如下修正

$$f_w = \frac{f_a}{\sqrt{1+\beta\Gamma}} \quad (6.8\text{-}15)$$

式中，$\beta = \rho_w D/\rho_m t$；$\rho_m$ 为圆板密度；ρ_w 为液体密度；Γ 为量纲为 1 的修正因子。对于液体为水且在一阶谐振频率下振动时，Γ 等于 0.746 313。

压电驱动器的设计首先要满足频率要求，对于一般的工程应用，式（6.8-13）~式（6.8-15）可以满足设计精度要求。如果需要更精确的设计压电驱动器的频率，可以根据 Rayleigh－Ritz 方法计算压电驱动器自由振动频率，再用本文式（6.8-15）进行修正。

压电驱动器的振动是微滴产生的前提。根据对微滴形成判据的讨论，可以针对应用要求大致确定出使微滴顺利喷射出腔体内所需的液体压力，从而可以计算出压电驱动器所需的变形量。

对于图 6.8-25 所示的结构，当压电驱动器振动时，忽略入口损失，腔体内部压力为

$$p = K_v\frac{\Delta h}{\kappa_s h_c} \quad (6.8\text{-}16)$$

式中，Δh 为压电驱动器的振动幅度；κ_s 为液体的体积压缩系数；h_c 为腔体深度。$K_v = \dfrac{\Delta V}{\frac{\pi}{4}D^2\Delta h}$ 为体积系数；D 为腔体直径，对于图 6.8-26 所示腔体，在压电驱动器小振幅振动下，K_v 近似认为是一个常数，可取 0.3。对于水溶液，判据 2 更严格，将式（6.8-16）代入判据 2，则有

$$\Delta h = \frac{3}{8}\frac{We}{K\nu}\left(\frac{L_0}{a_0}\right)\left(\frac{h_c\sigma}{a_0}\kappa_s\right) \quad (6.8\text{-}17)$$

实际设计中考虑入口损失、压电驱动器 Δh 通常取计算值的 2~5 倍。在上述计算中，没有考虑腔体内部混入气泡的影响，如果腔体内部混有气泡，会导致 Δh 实际为计算值的几十倍。在实际设计中，应考虑避免腔体内产生气泡。

振动幅度与驱动器尺寸有如下关系

$$\Delta h = K_p\Phi\frac{D^2}{t^2} \quad (6.8\text{-}18)$$

式中，K_p 为结构系数，Φ 为驱动电源电压。当电压一定时，可以根据式（6.8-17）、式（6.8-18）确定驱动器尺寸。

综合以上讨论可知，压电驱动器的设计必须满足频率条件和振动位移条件，即必须满足式（6.8-13）~式（6.8-15）、式（6.8-17）和式（6.8-18）。

3.2.4 腔体尺寸设计

由于腔体的直径近似等于压电驱动器的直径，喷嘴直径需要根据应用要求选定，所以腔体结构参数设计是指腔体深



度、入口尺寸和喷嘴长径比的选定。当压电驱动器振动产生压力时，腔体内液体将同时从入口和喷嘴向外流动。考虑液体为黏性流体的情况，则边界层厚度可以根据下式来计算

$$\delta = \sqrt{\psi t_w} \qquad (6.8\text{-}19)$$

式中，ψ 是液体黏度，当喷嘴直径在 40 μm 以上时可以认为边界层厚度远小于入口和喷嘴半径，进而可以认为入口和喷嘴内部液体速度相同，则入口损失流量为：

$$Q_{loss} = \frac{r_{in}^2}{r_{in}^2 + a_0^2} \times 100\% \qquad (6.8\text{-}20)$$

式中，r_{in}为入口半径，为了减小入口流量损失，一般 r_{in}取值较小，其与 a_0比值可取 0.5 左右。

根据式（6.8-17）可知，腔体深度 h_c 与所需压电驱动器振幅 Δh 成正比，所以在设计时应该尽量减小腔体深度 h_c 的值。

喷孔的长径比也应该尽量减小，长径比过大，根据式（6.8-17）可知，需要腔体内部压力 p 和压电驱动器振幅 Δh 很大。喷孔的长径比对喷射的效果有很大的影响。根据对腔体内部流体运动状态的有限元模拟结果，腔体内部流体速度很小，在腔体结合部，流体速度变化非常剧烈，如果喷孔长径比过小，液体没有形成稳定的速度就喷射出来，微滴喷射出后呈发散状。实际上，多数喷孔长径比设计在 5 左右，同时，腔体与喷嘴的结合部应该用圆角过渡。

喷嘴的形状和加工质量也会对喷射有很大影响，喷嘴加工不对称，容易造成液滴在喷孔处偏聚，影响正常的喷射，甚至造成喷射中断。喷嘴的粗糙度大则会增加液体的流动阻力。

3.2.5 电参数设计

电参数设计包括波形、频率、幅值和脉冲宽度设计。

比较同样脉宽的三角波、正弦波和矩形波，如果作用在同样阻抗和功率因子的电路上，矩形波的输入功率最大，所以波形选择矩形波。

脉冲频率：压电驱动器在各种电压下的阻抗曲线变化趋势均相同，即开始时很大，随后突然下降，接着平缓下降，在驱动器谐振频率附近阻抗最小；随着频率进一步增大，阻抗增大。所以在施加不同的脉冲频率下时，压电驱动器的振幅有所不同，当脉冲频率在驱动器谐振频率附近时，压电驱动器振幅最大，则脉冲频率可以根据式（6.8-15）确定。

脉冲宽度：矩形波的脉冲宽度可以用下面公式计算得出由于

$$V_{eject} = \int_0^{t^*} U_o(t)\pi a_0^2\,dt = \frac{4}{3}\pi a_0^3$$

所以

$$t_w = \sqrt{\frac{8}{3}\,\frac{\rho L_0 a_0}{p}} \qquad (6.8\text{-}21)$$

也可以进一步近似为

$$t_w = V_{eject}/U_o A \qquad (6.8\text{-}22)$$

由式（6.8-22）可知，随着脉冲宽度增加，液滴会变大，并逐渐从滴状过渡到液柱状。因此在实际使用中可以通过调节脉冲宽度来改变喷射微滴的大小。

脉冲幅值：当压电驱动器的电场强度小于 1 MV/m 时，脉冲幅值越高，喷射流量越大；当电场强度大于 1 MV/m 时，压电陶瓷的应变曲线将进入蝶形区域，会产生很大的电致应力，压电驱动器工作不稳定，并会导致压电驱动器的损坏；脉冲幅值应控制在使压电驱动器所加的电场强度小于1 MV/m。

电源的稳定性也对喷射过程有直接的影响，电源的稳定精度控制在 0.1%以内，有利于形成尺寸大小均匀的液滴。

3.3 压电驱动微滴喷射系统的实现

实际设计中，除了要保证上节所讨论的原则外，还要考虑实际的应用环境要求，以及满足装配、加工要求，并且应用到快速成形领域提出的体积、黏度、耐腐蚀的要求。下面将结合这些要求来进一步讨论压电微滴喷射装置的设计。

3.3.1 压电驱动器设计

利用压电材料的逆压电效应，有各种类型的压电驱动器，包括棒状、块状、双晶体片状、圆片状等。当用于中低黏度流体材料的喷射时，需要产生较大的压力，要求压电驱动器产生较大的位移，同时要求频率高，体积小，易于集成化，加工方便。

选择压电陶瓷－金属复合体作为压电驱动器，它具有体积变形大、制作简单等优点，根据直径的不同，频率可以从数百到数千赫兹，也可以满足压电微滴喷射装置对频率的要求。

压电陶瓷－金属复合体有两种结构：单晶片式和双晶片式。单晶片式结构如图 6.8-23 所示，由一片压电陶瓷膜片与一片金属膜片粘接而成，压电陶瓷表面镀有银层作为电极，工作时压电陶瓷膜片作为正极，铜片作为负极。单晶体片这种结构最简单，加工工艺也简单，工业上大量用作蜂鸣器驱动。

双晶片式是由两片压电陶瓷膜片与一片金属膜片粘接而成，结构如图 6.8-24 所示，工作时，中间金属膜片作负极，两边压电陶瓷膜片并联作正极。

相对于单晶片式，双晶片式驱动器在相同电场下，把两面压电陶瓷的变形量相叠加，因此能够产生更大的位移量，如长 30 mm 厚 0.5 mm 的双晶片能产生 200 μm 的位移量，将近为单晶片的两倍。但是双晶片用于微滴喷射中，一面会浸在要喷射的流体材料中，流体材料如果具有导电性，会造成正负极导通。同时，如果流体材料有腐蚀性，也要考虑流体材料对压电陶瓷膜片表面镀银层的腐蚀作用。

为了得到更大的位移和驱动力，还可以考虑更复杂的复合结构型压电驱动器。根据复合体中压电陶瓷与金属顶盖之间的间隙形状，可以分为 Cymbal 型和 Moonie 型，其结构如图 6.8-27 所示。

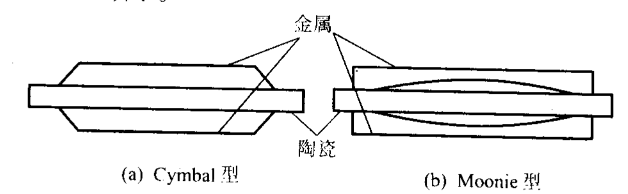


图 6.8-27 复合结构型压电驱动器

这两种结构综合利用了压电陶瓷的纵向和横向压电效应，从而能得到更大的位移，其他方面性能也有所提高。表 6.8-1 所列是复合型压电陶瓷驱动器与双晶体片型压电驱动器的各方面性能比较。由表可见 Cymbal 型具有更好的综合性能，在相同的驱动电压下，位移大、响应速度快、稳定性好。定型后的压电微滴喷射装置可以考虑采用 Cymbal 型复合驱动器以提高工作稳定性。

表 6.8-1 几种复合结构压电驱动器性能比较

特 性	双晶片	Moonie 型复合	Cymbal 型复合
尺寸（直径×厚度）/mm	12.7×0.6	12.7×0.6	12.7×0.7
驱动电压/V	100	100	100
位移/μm	35	30	40

续表 6.8-1

特　性	双晶片	Moonie 型复合	Cymbal 型复合
稳定性	低	中	高
响应时间/μs	100	100	5~50
加工方式	粘接	粘接	粘接
成本	低	低	低

再对比单晶体片与双晶体片的优缺点，在相同的驱动电压下，双晶体片的驱动位移较大，从而能够产生较大的压力。但是双晶体片的一面浸在流体材料中，要求流体材料不能导电，不能具有腐蚀性。本文在研究中，曾对浸在流体材料的一面涂上一层厚度约为 0.1 mm 的绝缘层保护，但因此又导致了位移量一定程度上的损失。本文通过对单晶片压电驱动器结构的优化设计，使单晶体片结构产生了较大的位移，解决了单晶片位移小的问题，所以最终选择了单晶体片压电驱动器这种最简单的结构。

3.3.2　腔体结构形式选择

腔体的作用是用来暂时储存液体，并与压电驱动器配合形成液体压力的波动，将液体喷射出去。腔体的形式以及结构参数对形成稳定的喷射有着重要的作用。从结构上来说，压电喷墨打印领域中主要有如图 6.8-28 所示 4 种结构。

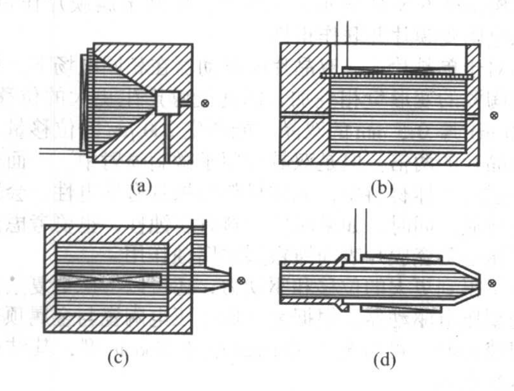


图 6.8-28　压电驱动喷墨打印头腔体结构示意图

由于本研究采用单晶体片结构，所以采用图 6.8-28b 的结构形式。考虑到喷射对象可能包括腐蚀性流体材料，会对喷头各部件产生一定的腐蚀作用，可能需要定期更换，为了拆卸和更换方便，在喷头的整体设计中把入口（进口连接件）、腔体、喷嘴均做成可拆卸式结构。

考虑到在工作前，需要把工作液体重新灌入（灌泵），将腔体内空气排干净；在成形完毕后，需要将腔体内液体抽走，并补充腔体内部的空气，设计了放气阀。最终结构如图 6.8-29 所示。

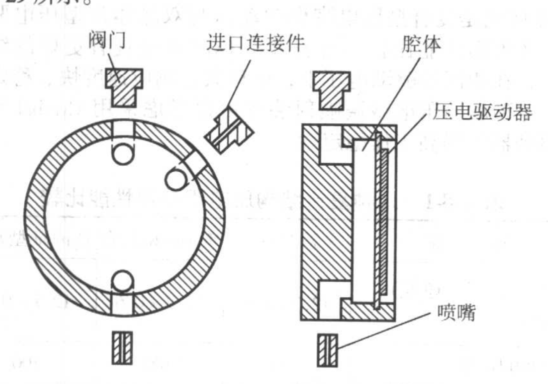


图 6.8-29　最终腔体结构示意图

放气阀可以是电磁阀，由计算机来控制其开启和关闭。在灌泵时，由入口提供一定的压力的流体，将放气阀开启，由于放气阀在腔体的最高点，空气会顺着放气阀自动排出。同理，当需要排干腔体内部液体时，入口处提供一个负压，以便使腔体内部的液体流回供液系统。实际使用中，只需要简单地改变一下供液系统的液面高度即可提供额外的压力和负压，易于实现自动操作。

3.3.3　入口、出口（喷嘴）设计

入口与出口（喷嘴）是喷头设计中的关键部分之一。由于压电驱动器振动时的形变量很小，腔体内部的体积变化量也很小，为了合理的利用压电驱动器产生的形变在腔体内部形成较大的压力，应该使腔体内部液体压力升高时候，喷嘴处流动阻力较小，入口阻力较大，使腔体内受到挤压的液体能够顺利在喷嘴处喷射出；在腔体内部压力降低时，入口阻力应该很小，便于腔体液体能够得到顺利的补充，喷嘴阻力较大，避免空气从混入腔体内部。

常用的方法是在入口、出口处设计单向阀。用厚0.1 mm 的橡胶薄膜固定在腔体底部，在入口处，切割出一个直径略大于入水口的半圆形开口，即形成单向阀。使流体在进入腔体时薄膜阀能够打开，而腔体内的流体不能通过薄膜阀流出。单向阀的设计，使喷射进行时，流体不再有通过入水口回流的损耗，入水口孔径可以增大，增加流体供应的顺畅性，同时能够提高喷射时腔体内部液体的压力。

3.4　喷射过程中微滴形态控制

3.4.1　液滴的形态

借助于高速摄影仪观察到了微滴从喷嘴喷出后的形状，如图 6.8-30 所示。图中，微滴形状呈长条形，长径比大约为 6~12∶1，微滴直径约等于 1.1~1.2 倍喷嘴直径。

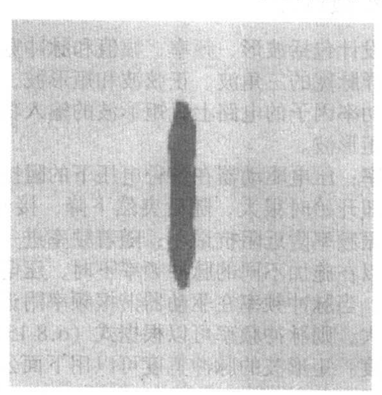


图 6.8-30　微滴形状图

微滴体积与电参数（脉冲占空比、频率、电压）、结构参数（腔体深度、喷嘴直径、喷嘴长径比）等都有关系。但当这些参数改变时，微滴直径变化很小，主要是微滴长度随着参数改变而导致微滴体积发生变化。

利用这一特点来改变液滴的大小，可以极大的增大成形过程的柔性。在实际成形时，腔体的结构参数是已经确定的，驱动信号频率一般也不改变，驱动电压调节不方便，所以可以通过调节驱动信号的占空比来调节喷射液滴的大小，实现数字化喷射。

3.4.2　微滴均匀性

微滴是否均匀关系到最终成形的效果，是衡量喷射效果的一个重要指标。本文认为微滴均匀性包括两个方面，一方面是液滴本身大小均匀，另一方面液滴之间的间隔也必须非常均匀。

根据实验中观察到的现象。液滴在喷出后下落的过程中，受到空气阻力作用，液滴的大小和相互之间的间隔会发

生变化，而直径相对不变。所以可以使用液滴的长度来衡量液滴的大小，将喷出的第一个完整液滴的长度作为液滴的长度，而将第一个完整液滴与第二个完整液滴直径的间隔作为液滴直径的间隔。

图 6.8-31 所示为使用高速摄像机拍摄的一组液滴长度统计结果的直方图，图 6.8-32 为相应的液滴间隔统计直方图。

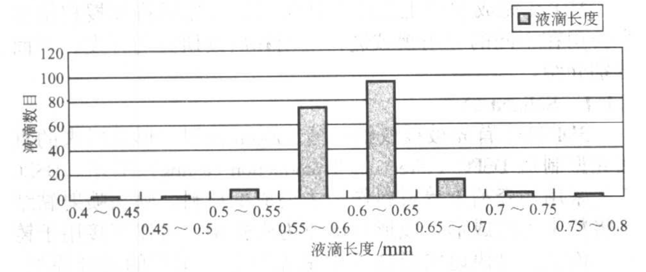


图 6.8-31　液滴长度统计直方图

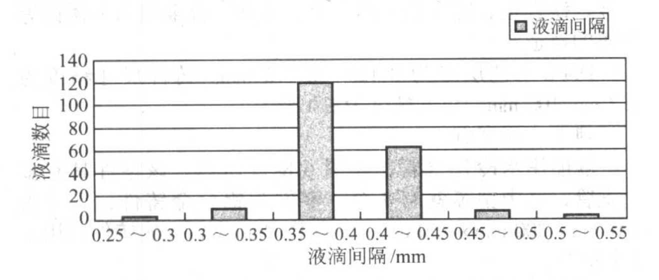


图 6.8-32　液滴间隔统计直方图

从图中可以看到，微滴长度平均值大约为 0.6 mm，在 0.55 ~ 0.65 mm 区间内液滴占总数（200 个）的 85.5%，液滴平均间隔为 0.4 mm，在 0.35 ~ 0.45 mm 区间内占总数（200 个）的 91%。

决定微滴均匀性的主要因素为压电片振动是否均匀。压电片振动是否均匀受很多因素影响，压电片加工、装配是否有缺陷；驱动电路具有温漂，在工作过程中，会造成驱动电压、频率等参数发生变化；这些因素都会改变压电片的振动状态。

3.4.3　喷射的定向性能

在成形中，有时候成形环境比较恶劣，喷嘴与成形面需要相距一段距离。这个时候，微滴喷射的定向性能就比较重要。

在实际应用中，微滴喷出喷嘴后难以严格按照喷嘴的轴线方向向前运动，而是与中轴线存在一个角度，由于这种现象是随机的，角度大小和偏转方向都具有不可预测性，在宏观表现上不是微滴倾斜，而是液滴喷射的发散。目前还没有研究微滴喷射过程中发散问题的专门理论，因此本研究定义发散角来说明此现象：如果喷射流量的 95% 集中在距离 H，半径为 R 的圆锥范围内，则将 $\theta = \arctan\dfrac{R}{H}$ 定义为微滴喷射的发散角。如图 6.8-33 所示。

这种微滴喷射的角度发散主要由于下面几个原因造成的：

1）喷射速度过大；

2）喷头设计的不对称性；

3）喷头特别是喷嘴的加工质量不高；

4）微滴喷出以后，由于微滴质量很小，容易受到周围环境气流等的影响。

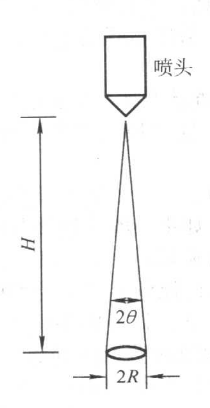


图 6.8-33　微滴发散图

值得指出的是，微滴的偏转是不可避免的，在设计时，适当减小喷射速度、增加喷嘴的长径比、提高喷嘴的加工质量（提高圆度，减少粗糙度等）可以减小微滴的偏转角度。

3.4.4　喷射频率与粘度范围

从理论上说，弯曲型压电微滴喷射装置，工作在 0 ~ 1 kHz频率范围以内都可以形成比较稳定的喷射。但是实际工作中，由于驱动电路存在温漂，导致驱动频率的变化，这样会导致喷射微滴大小随时间变化。为了得到均匀的液滴，一般选择液滴体积对频率不敏感的区间工作。

黏度越大，喷射阻力越大，使液滴脱离母体所需要的力越大，喷射所需要的电压也越高。因此严格来说，针对某种特定的流体材料，必须根据流体的黏度、表面张力系数、密度、压缩比等性能参数来设计专用的压电驱动喷射装置。

从理论上说，当喷射黏性液体时，应该增大压电驱动器直径（增大压电驱动器的位移）、减小腔体深度和喷嘴直径。但是，压电微滴喷射装置的粘度范围是有一定限度的，超过一定范围则很难使液滴脱离母体，不能形成喷射，只能观察到液体从喷嘴流出。进一步减小腔体深度效果也不明显。

3.4.5　喷射的失效分析

由于微滴本身的质量很小，在发展、形成，一直到喷射出的过程中极易受到外界因素的影响，而导致微滴形态、速度产生变化，达不到预定的要求，本文称之为喷射失效。喷射作用力过高、过低，腔体或者喷嘴加工质量不高，喷嘴材料不合适，压电驱动器振动不均匀都有可能导致喷射失效的情况发生。

喷射失效有微滴喷射方向倾斜、液滴偏聚、产生行星液滴等几种情况。

微滴喷射方向倾斜如图 6.8-34 所示。产生微滴倾斜的可能原因如下。

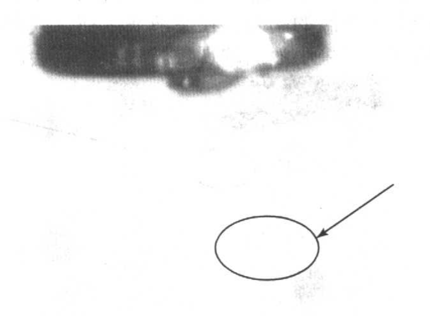


图 6.8-34　微滴喷射方向倾斜图

1）喷射压力不足，导致喷射不稳定，液滴喷射一个方向倾斜。解决方法包括提高驱动电压，或者改进腔体设计，减小阻力。

2）喷头的加工质量不高。喷头的加工质量主要是指表面质量和形状精度，这里最主要的是指出水口内壁的粗糙度，喷嘴口的圆度。

首先，喷嘴壁越是光滑，流体可能受到的阻力越小，越有利于喷射。其次，如果喷嘴的轴线与喷头的轴线不平行，就会导致所喷出的液流偏斜。喷嘴口的加工不均匀，圆度不高，也容易使喷射出的流体出现飞溅和偏斜，尤其在电压稍低或处于非谐振频率下，驱动器所提供的能量不是最大时。

图6.8-35所示为液滴偏聚的现象。液滴偏聚对微滴喷射效果影响很大，而且不容易解决。引起液滴偏聚的原因是由于液体－喷嘴金属之间的润湿现象。由于喷嘴的加工不可能完全对称，这样会导致浸润不均匀。随着喷射的进行，不均匀的浸润会导致液体在某一方向的偏聚，液滴偏聚也会导致液滴喷射向某一方向偏斜，严重时会导致喷射中断。

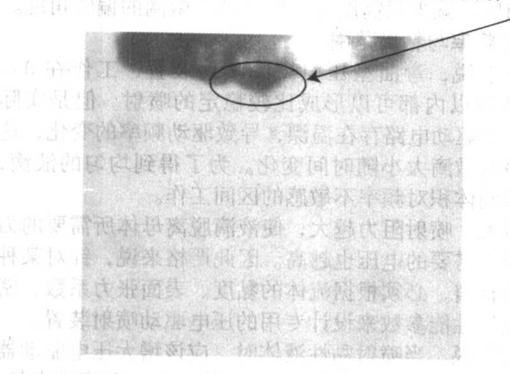


图6.8-35 液滴偏聚图

解决液滴偏聚问题可以提高喷嘴处的表面加工精度，喷嘴口处平台的表面不仅要求光滑，更要求均匀。

解决液滴偏聚最根本的方法，是设计喷射平衡态液面的时候，使液面比喷嘴稍高，这样可以避免偏聚现象的产生。如图6.8-36所示。

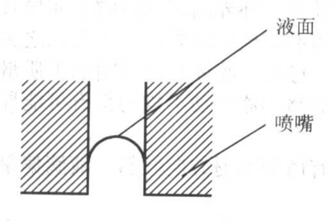


图6.8-36 液面示意图

图6.8-37所示为液滴产生行星液滴的图片。行星液滴是指在产生主液滴的同时，在主液滴之前，或者在之后，或者在前后同时产生小液滴的现象。行星液滴会严重破坏成形的质量。产生行星液滴的原因比较复杂，牵涉到液柱断裂的机理，很多文献已经进行了分析。行星液滴的产生主要是跟液体的性质和喷射速度有关，可以通过调节液滴的喷射速度来避免行星液滴的产生。

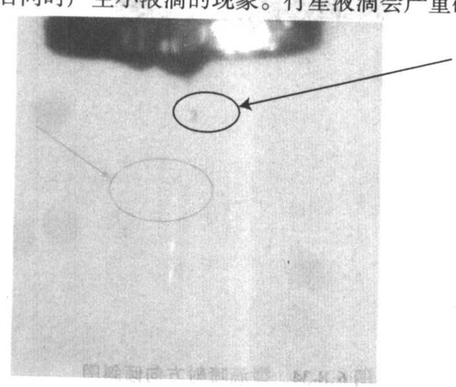


图6.8-37 行星液滴图

4 3DP工艺的应用

4.1 基于MIT三维打印专利的应用

MIT在完成3DP工艺原理性研究后，先后将其授权给多个公司在不同的应用领域进行应用和后续研究与开发，下面分别介绍。

4.1.1 Soligen公司

3DP技术首先被授权给美国Soligen公司，形成后来的直接壳型制造DSPC（direct shell production casting）工艺。DSPC工艺采用陶瓷粉末等材料作为主要成形材料，喷头喷射黏结剂将粉末黏结成形。成形后即成为陶瓷型，可以直接用于铸造。该工艺是快速成形技术中最先制造出实用的陶瓷原型。由于不需要单独制作和装配型芯，该工艺可以铸造出形状非常复杂的铸件。目前DSPC工艺制造的陶瓷型已经应用于铝合金、镁合金、锌合金、铜合金、铸铁、合金钢和不锈钢等金属的铸造。

DSPC工艺层厚为0.125～0.175 mm。铸件尺寸精度为±2 mm/100 mm，角度精度为±0.5°。

典型应用案例：

舰船用水冷排气管，如图6.8-38所示。该零件具有多个支管，其中型芯就有7个。零件为铝合金铸件，尺寸为400 mm×200 mm×150 mm。从陶瓷型制作到完成铸件共用了3个星期。

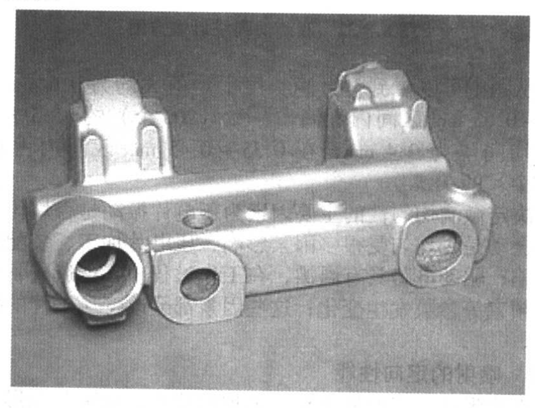


图6.8-38 舰船用水冷排气管

目前该公司只提供技术服务，还没有商品化设备推出。

4.1.2 Z Corp.公司

Z Corp.公司也使用了MIT专利，主要用于概念模型成形机的研制和销售。其工艺主要以淀粉掺蜡或石膏基的材料为原料，将黏结剂喷射到粉末上黏结造型，其成形件可以用于熔模铸造。另外，该公司的设备在成形彩色零件方面具有独特的优势，如图6.8-39所示，其特点是可以成形全彩色的原型，实现色彩的自由过渡。这一点在快速成形技术发展史上是具有重要地位的。

1997年起Z Corp.陆续推出3D Printer系列机型，包括Zprinter 310 System，Z406和Z810等。其中，Z810如图6.8-40所示，图6.8-41是该设备成形的原型。

Z810设备参数如表6.8-2所示。

Z Corp.工艺和设备有以下优点。

1）成形速度快 由于其采用多喷头阵列，并且不强调原型的强度，因此可以达到较高的成形速度。

2）成本低廉 其设备和成形材料价格都较低，因此其购



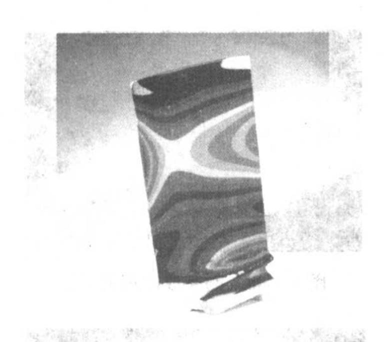


图 6.8-39　彩色零件

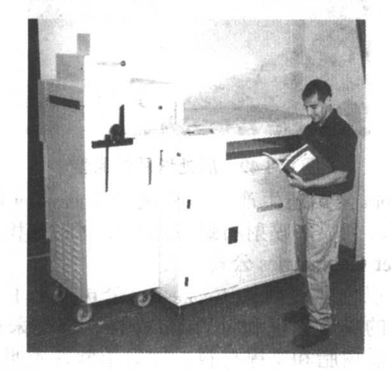


图 6.8-40　Z810 成形机

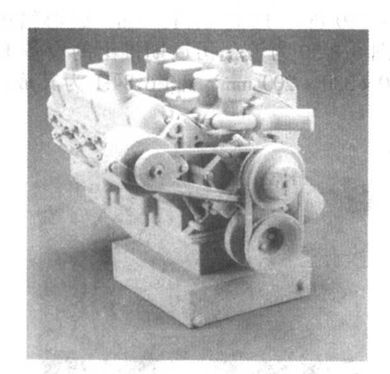


图 6.8-41　Z810 设备成形的原型

置、维护和运行的成本较低。

表 6.8-2　Z810 设备参数

成形空间/mm	500 × 600 × 400
层厚/mm	0.076 ~ 0.254
设备尺寸/mm	241 × 114 × 193
设备质量/kg	565

3）成形材料广泛　Z Corp. 主要有三种成形材料体系，分别为石膏基、复合材料基和淀粉基。石膏基适合于制造高强度原型和精细结构，尺寸精度较高，可以达到 0.1 mm/100 mm。另外采用石膏基材料还可以成形彩色原型。复合材料基的成形材料具有较好的强度和弹性，适合于制作装配型的原型。采用淀粉基的材料成形速度快，适合于制造大体积原型，并且可以用于熔模铸造（低熔点合金铸造，例如铝合金、锌合金和镁合金等）。以上三种材料均可以进行一定的后处理，包括渗蜡、渗树脂或者双组分环氧树脂以提高强度和韧性，还可以打磨和着色，并且可以电镀处理。

4）设备使用和维护简单。

2003 年该公司取得了很好的销售业绩，共销售各种成形设备 349 台套，比 2002 年增长了 26%，被评为美国增长最快的 500 家私营企业之一。这也从一个方面说明了快速成形技术发展的方向之一。

4.1.3　Extrude hone（ProMetal）公司

ProMetal 隶属于 Extrude Hone 公司，也是 3DP 技术的重要使用者之一。其成形工艺包括两个方面：一是以 S15 成形机为代表，主要成形铸造用型芯；二是以 R10 机型为代表，成形金属零件。该工艺主要以钢、钢合金、镍合金和钛铝合金粉末为原料，将黏结剂喷到粉末上使之黏结成形，完成成形后再进行烧结或者渗入低熔点金属。其最终零件一般包含 60% 的钢和 40% 的黄铜。2002 年 ProMetal 推出 R2，R4，R10 机型，具有 8、16、32、64、96 不等的多喷嘴喷头，精度可达 ± 0.125 mm。图 6.8-42 为 R10 机型，其成形空间为 1 000 mm × 500 mm × 250 mm。图 6.8-43 为其成形的金属零件。该工艺适合制造的零件包括原型工具、生产工具、结构件和包扎工具等。



图 6.8-42　R10 成形机



图 6.8-43　R10 成形的零件

4.1.4　Therics 公司

Therics 公司利用 MIT 的专利技术来制造可植入人体的医疗产品，包括可降解的支架、软骨、腱和骨的替代物。

该公司开发的 TheriForm 工艺可以根据不同产品的需要使用不同的黏结剂，并且可以使用各种活性物质，包括生长因子、肽、蛋白质和抗生素等。该工艺可以制备多孔的结构，孔隙率可以根据需要由工艺参数方便地进行调节。图 6.8-44

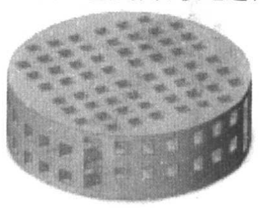


图 6.8-44　骨植入物

是 TheriForm 工艺制造的产品；图 6.8-45 为植入后的组织切片，可以看出骨组织已经愈合。

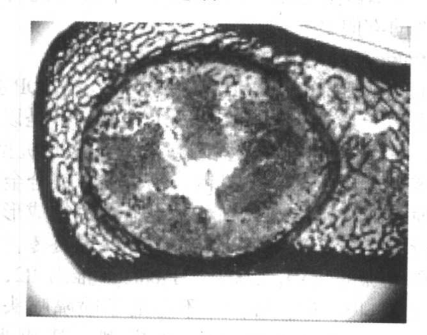
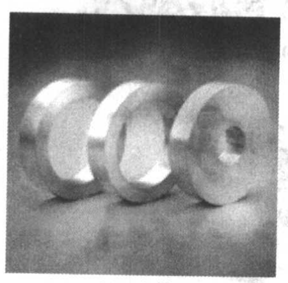


图 6.8-45 组织切片

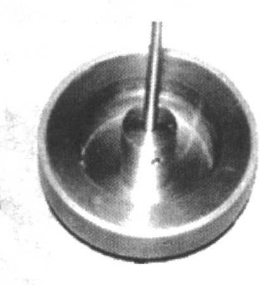
目前该公司正在和 MIT 合作开发梳状高聚物的喷射成形及其应用。梳状高聚物可以作为细胞表面反应的媒介，具有广阔的应用前景。

4.1.5 基于 3DP 的其他公司

另外还有几家公司经 MIT 授权使用 3DP 技术进行生产研究，包括 Specific Surface 公司、TDK 公司和 Metal Matrix Cast Composites（MMCC）公司等。其中 Specific Surface Corporation 用来制造高级过滤器。TDK 利用 3DP 技术制造电陶瓷器件和小尺度（2 mm × 3 mm × 4 mm）的电器。MMCC 公司利用 Z Corp.公司的设备制造复合材料零件。其工艺特征是先采用陶瓷粉末粘接成形，然后在压力下渗入金属（例如铝等）得到最终零件。这种零件具有很高的比强度或者其他优异的复合性能。图 6.8-46 为该工艺制造的零件。



(a) 飞轮



(b) 挡圈

图 6.8-46 MMCC 公司制造的零件

4.2 其他采用微输运技术的工艺

4.2.1 3D System 公司

3D System 公司较早注意到三维打印工艺的重要性，并开发了基于喷射技术的成形设备。目前代表产品为 InVision，如图 6.8-47 所示。该设备采用多喷头喷射光敏树脂，并在紫外光照射下固化成形。InVision 的成形（图 6.8-48，图 6.8-49）平面的分辨率为 328 × 328 dpi，垂直方向为606 dpi（对应的最小层厚为 0.042 mm）。其支撑材料可以加热熔化，使用方便。



图 6.8-47 InVision 设备

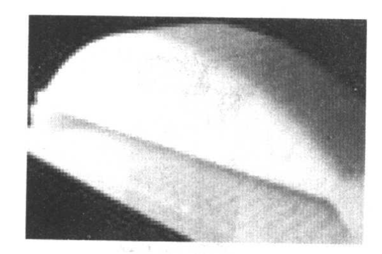


图 6.8-48 刚完成成形的原型

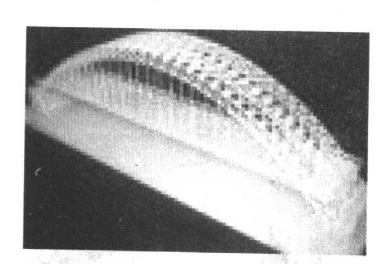


图 6.8-49 后处理后的原型

3D System 公司还生产一种称之为 ThermoJet 的快速成形设备，采用阵列喷头喷射石蜡等高分子材料堆积成形。

4.2.2 Objet Geometries 公司

2000 年以色列的 Objet Geometries 公司推出了 Quadra 成形机。该设备的成形原理和 InVision 一样，都是采用阵列喷头同时喷射光敏树脂和支撑材料，然后用紫外光照射固化光敏树脂完成三维堆积成形。其喷头上集成了 1 536 个喷头，分辨率为 600 × 300 dpi，层高 0.016 mm，成形精度可以达到 0.075 mm。图 6.8-50 为该公司近期推出的设备 Eden330，成形范围为 340 × 330 × 200 mm^3。图 6.8-51 为其成形的部分原形。

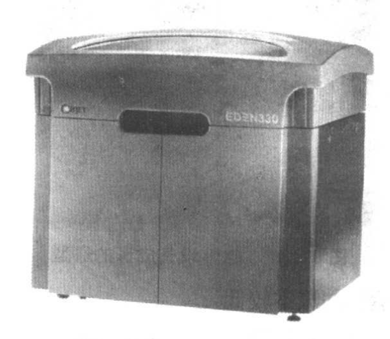
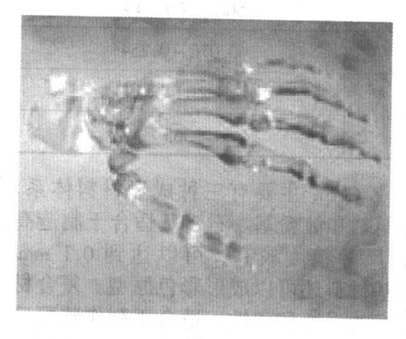


图 6.8-50 Eden330 成形机



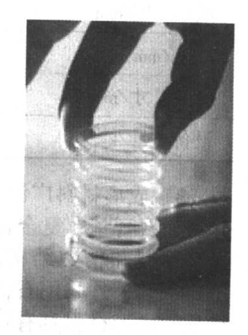


图 6.8-51 Eden330 制作的原型

该工艺具有以下几个明显的优点：

1）不使用激光器，大大降低了设备的成本。同时降低了设备尺寸，适合于办公环境；

2）采用紫外光边喷射边固化流程，显著加快了成形速度；

3）支撑易于去除，具有较高的精度。

4.2.3　Envisiontec 公司

Envisiontec 公司开发了 Bioplotting 工艺，并应用于生物制造领域。其基本原理是采用气压将流体生物材料喷射出来，然后在某种介质中完成粘接和堆积成形，如图 6.8-52 所示。在介质中完成堆积成形可以避免喷射出来的成形材料在重力的作用下坍塌。图 6.8-53 为 Bioplotting 工艺成形的部分支架，其材料包括硅有机树脂、尼龙、左旋聚乳酸等。该工艺是目前制备组织工程载体支架的典型工艺之一，也是制备类活体组织的典型工艺之一。部分研究单位采用这种方法利用活细胞及其培养液制备了具有一定生理功能的类活体组织。

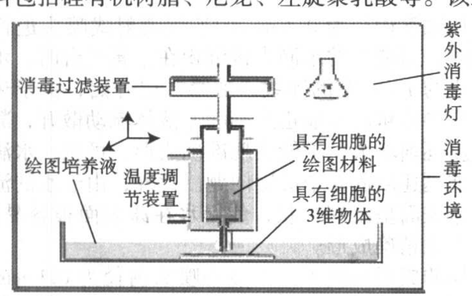


图 6.8-52　Bioplotting 工艺原理

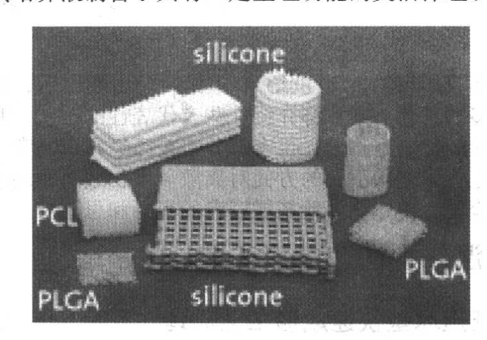


图 6.8-53　Bioplotting 工艺成形的部分支架

三维打印是目前快速成形技术中最具发展潜力的方法之一。其主要特点是成形材料范围广泛，成形过程对成形材料没有或者少有影响，并且具有相当高的成形精度，因此是生物制造和微纳制造的用力工具之一。

编写：吴任东（清华大学）

第 9 章　其他快速成形工艺

快速成形技术自 20 世纪 80 年代后期出现以后，涌现出种类繁多的工艺。本章将介绍一些有代表性的工艺，其中一些工艺尚处于研究阶段，也有部分工艺已经在市场竞争中被淘汰。这些工艺从不同的方面对离散 – 堆积成形原理给予了不同的诠释，希望能藉此拓展读者的视野和思路。

1　低温冰型快速成形工艺

1.1　低温冰型快速成形工艺原理

低温冰型快速成形工艺（rapid ice prototype forming，简称 RIPF）的概念是由清华大学和美国 Missouri – Rolla 大学于 1998 年同时提出的。该工艺和三维打印类似，都是以微滴喷射技术为使能技术。其特点是采用水及水溶液为成形材料，在低温下喷射并瞬时凝固完成粘接和堆积成形。为了使水滴能够凝固成形，低温冰型快速成形系统除了具备三维运动系统之外，还应具有保持足够低温的成形室。图 6.9-1、图 6.9-2 所示分别为清华大学和美国 Missouri – Rolla 大学的冰型实验系统。

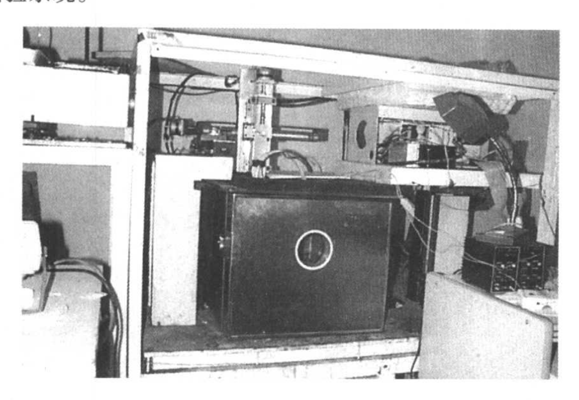


图 6.9-1　清华大学低温冰型实验装置

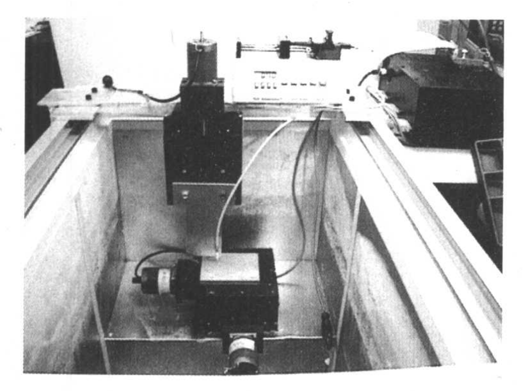


图 6.9-2　Missouri – Rolla 大学的低温冰型实验装置

1.2　低温冰型快速成形工艺研究

该工艺涉及临界成形时间、喷射流量与扫描速度的匹配、参数优化等关键技术问题，下面分别讨论。

1.2.1　成形实现的基本条件

对于 FDM、3D Plotting 这些喷射热塑性材料成形的快速成形工艺，由于材料熔融后黏度大，且这些材料是具有熔融中间态的非晶材料，离开喷嘴沉积到成形面后能够较好地保持形状，因此只要每层扫描周期大于材料固化时间，就可以保证成形。但低温冰型成形则不同，材料凝固或发散均不利于成形。

如采用喷嘴内径为 0.3 mm 的连续喷射式喷头进行成形工艺试验时，当喷出的水滴直接沉积在金属平台时，水可以迅速凝固成约 1 mm 宽的冰线；从第二层开始，由于热传导条件的改变导致水滴不能迅速凝固，液体流动散开，凝固后的冰线宽度逐渐增大，不能实现准确成形。可见，水滴能不能在散开前迅速凝固是个关键问题。此外，由于水的流动性好，水在冰表面呈浸润性状，使得水在冰表面很容易扩展，最终导致不能精确成形。

在同样的成形环境下，当减小喷头内径为 0.1 mm 并采用离散喷射方式喷射时，由于喷嘴内径很小，每层路径上沉积的水量也很少，水从喷嘴喷射到成形面后凝固时间非常短，几乎观察不到液态，凝固的冰型线宽为 0.8 ~ 1 mm，可以精确地成形冰型。

上述对比试验说明，水的完全凝固只是成形的必要条件，迅速凝固才是实现冰型准确、逐层凝固—堆积成形的充要条件。

在成形的充要条件这一点上，低温冰型快速成形工艺与 FDM、3D Plotting 等喷射热塑性材料成形的 RP 工艺不同。对热塑性材料，当材料沉积到路径时处于熔融态，具有较好的形状保持性。而水是晶体，水→冰是液固相变过程，液体无法保持形状，凝固后形状和尺寸因凝固时间的长短而不同。为了保证精确“成形”，必须保证水凝固得足够快。因此，水的凝固时间足够短是决定成形与否的关键因素。

根据上述试验现象，对于低温冰型 RP 工艺，存在临界凝固时间的概念，临界凝固时间指的是能够实现冰型快速成形所允许的凝固时间的上限 t_{max}。当凝固时间 $t \leqslant t_{max}$ 时，具有可成形性；当凝固时间 $t \geqslant t_{max}$ 时，不能实现成形，如图 6.9-3 所示。

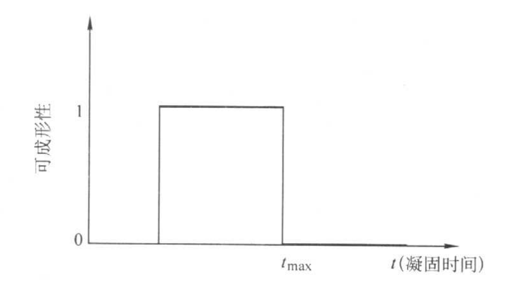


图 6.9-3　RP 工艺中凝固时间对成形性能的影响示意图

在成形中，凝固时间不是直接可以改变和控制的工艺参数，它受许多因素的影响，因此需要知道决定水凝固时间的可控因素，以便对成形研究提供更为明确的指导。

水凝固成冰所需时间可依据能量守恒定律求得。对于一个连续体，根据能量守恒定律，物体中内能增加等于物体从外界吸收的热量，同样，内能减少等于向外界散失的热量，数学表达式为

$$Q_{放} = Q_{散} \tag{6.9-1}$$

对于一定量的水，在一定的环境和散热条件下，水降温并凝固成 0℃的冰，所释放热量为

$$Q_{放} = Q_{T_0 \to 0℃} + Q_{潜} = mcT_0 + m\lambda \tag{6.9-2}$$



式中，m 为被凝固水的质量，kg；λ 为水的潜热，kJ/kg；c 为水的比热容，J/（kg·K）；T_0 为喷出水滴的初始温度，℃。

在低温成形环境中，水的热量散失主要途径是：水与已成形的冰型之间的热传导和水与空气之间的换热，根据热量传递公式

$$Q_{散} = Q_{传导} + Q_{换热} \tag{6.9-3}$$

$$Q_{传导} = -k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}S_1 t \tag{6.9-4}$$

式中，k 为冰的热导率，W/（m·K）；t 为凝固时间，s；$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$ 为温度梯度，℃/mm；S_1 为水与冰之间导热的截面积，mm²。

$$Q_{换热} = \alpha S_2 \Delta T t \tag{6.9-5}$$

式中，α 为水与空气换热系数，W/（m²·K）；S_2 为水与空气接触的面积，mm²；ΔT 为水与环境的温度差，℃。

将式（6.9-2）、式（6.9-4）、式（6.9-5）代入式（6.9-1），整理得到水凝固成冰所需时间求解公式

$$t = \frac{m\lambda + mcT_0}{-k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}S_1 + \alpha S_2 \Delta T} \tag{6.9-6}$$

从凝固时间求解表达式可知，影响凝固时间的变量有：m、T_0、$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$、$S_1$ 及 S_2。由于 S_1、S_2 同时也与 m 相关，因此在影响水凝固时间的各个因素中，可以方便控制的因素为 m 和 T_0。

进一步分析凝固过程中散失的热量，可以发现其主要由相变散热（$m\lambda$）和降温散热（mcT_0）构成。其中

$$m\lambda = m334.9\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$mcT_0 = m(4.186\,8\ \mathrm{kJ/kg\cdot K})6 = m25.2\ \mathrm{kJ/kg}\ (T_0\ 一般为\ 6℃)。$$

可见，相变散失的潜热是凝固散热量的主要部分，占总散热量的 93%，降温散热量占总散热量的 7%。因此，水的初始温度 T_0 对成形实现和成形质量影响不大。这样，影响临界成形时间的主要可控因素为 m。

1.2.2　喷射流量与扫描速度的关系

影响临界成形时间的主要可控因素 m 是指成形路径上单位长度沉积的水的质量。m 由喷射流量和扫描速度两个因素决定，m 与喷射流量成正比，与扫描速度成反比，即

$$m \propto 喷射流量/扫描速度$$

因此，临界成形状况必须综合考虑喷射流量和扫描速度两个因素。

设
$$\gamma = 喷射流量/扫描速度 \tag{6.9-7}$$

在相同的散热环境条件下，分别利用连续喷射式喷头和离散喷射式喷头对不同值下的成形临界状况进行了试验研究。

（1）连续喷射式喷头临界成形试验

对于连续喷射式喷头，喷射流量比较大，一般情况下难以实现准确的凝固 - 堆积成形过程。因此在利用连续喷射式喷头进行临界成形条件的试验中，采用了连续喷射式喷头能够获得的最小流量进行试验，即在使液体能够喷射出的最小喷射压强（出流阈值压强）下的流量。经过测量，喷射流量如表 6.9-1 所示。

表 6.9-1　连续喷射式喷头在出流阈值压强（14.7 kPa）下流量

出流阈值压强 P	14.7 kPa
喷射流量 L	0.05 mL/s

在上述流量下，改变扫描速度，得到不同的 γ 值和对应的能否成形结果，如表 6.9-2 所示。

（2）离散喷射式喷头临界成形性试验

对于离散喷射式喷头，喷射流量很小，在同样喷射压强的情况下，喷射流量比连续式小一个数量级。进行临界成形条件的试验中，取能够得到的最大的喷射流量，即在试验条件下可以获得的最大喷射压强 14.7 kPa，喷射频率 400 Hz 下的喷射流量。经过多次测量取平均值，喷射流量值见表 6.9-3。

表 6.9-2　连续喷射式喷头在不同 γ 下的成形状况

扫描速度/mm·s⁻¹	40	60	80	100	120	150	180
$\gamma/10^{-4}$mL·mm⁻¹	12.5	8.33	6.25	5	4.167	3.33	2.78
成形性	0	0	0	0	0	0	1

注：0—不能成形；1—能够成形，流量 0.05 mL/s，环境温度 -20℃，水的初始温度 20℃。

表 6.9-3　离散喷射式喷头在 14.7 kPa 压强下喷射流量

喷射压强 P	14.7 kPa
喷射频率 f	400 Hz
喷射流量 L	0.008 4 mL/s

在上述流量下，改变扫描速度，得到不同 γ 值，试验的临界成形状况结果如表 6.9-4 所示。

表 6.9-4　离散喷射式喷头在不同 γ 值下的成形状况

扫描速度/mm·s⁻¹	15	20	25	30	40	50
$\gamma/10^{-4}$mL·mm⁻¹	5.6	4.2	3.36	2.8	0.002 1	0.001 68
成形性	0	0	0	1	1	1

注：0—不能成形；1—能够成形，流量 0.008 4 mL/s，环境温度 -20℃，水的初始温度 20℃。

比较表 6.9-2 和表 6.9-4 的数据，可以确定在相同的散热条件和水的初始温度情况下，$\gamma \approx 2.8\times10^{-4}$ mL/mm 是可成形和不可成形的分界。当 $\gamma > 2.8\times10^{-4}$ mL/mm，无法实现水的迅速凝固、准确成形。但 γ 值也不是越小越好。后续优化工艺得出 $\gamma \approx 1.0\times10^{-4}$ mL/mm 时成形质量比较好，当 $\gamma < 0.2\times10^{-4}$ mL/mm 时成形质量逐渐变差。

1.2.3　工艺参数的优化

从 CAD 模型到制造出零件模型需要经历一系列的环节和过程，各环节间密切联系，每一阶段都会对最终成形零件精度产生影响。沿着冰型成形过程依次分析出影响成形质量的各种因素及其主次关系，并按照主次关系归纳为：

1）喷射流量/扫描速度，即 λ 值。
2）成形材料。
3）喷头与成形面间距离。
4）成形环境温度 T。
5）设备及控制系统精度等。

对这些工艺参数进行试验、分析和选择，然后合理地选择这些参数，可以为工艺提供基于试验条件下的优化参数组合。

（1）喷射流量/扫描速度

喷射流量和扫描速度共同决定着成形的可行性。喷射流量是指单位时间内从喷嘴喷射出来的液体的量。离散喷射式喷头的喷射流量由喷射压强、喷射频率和控制信号的占空比确定。

1）喷射压强对喷射流量的影响　喷头的流量可由 Lohms 定律确定

$$L = \frac{K\eta}{\mathrm{Lohms}}\sqrt{\frac{P}{G}} \tag{6.9-8}$$

式中，L 为流量，mL/s；P 为压力（即喷射压强，用水柱值

表示)，mmH_2O（1 mmH_2O = 9.8 Pa）；η 为黏度系数，Pa·s；G 为密度，kg/m^3；Lohms 为流体阻力，J/kg；K 为常数。

由式（6.9-8）可见，当喷射材料确定以后，喷出水流的流量与压力的平方根成正比。

在喷射频率、喷射占空比等参数确定情况下，对不同压强下的喷射流量进行了测量，试验数据如表 6.9-5 所示。

表 6.9-5　不同喷射压强下的喷射流量

（喷射频率 f = 400 Hz，占空比 30%）

喷射压强 P/9.8 Pa	1 000	1 200	1 360	1 800
$\sqrt{p}/\sqrt{9.8\ \text{Pa}}$	31.62	34.64	36.878	42.426
流量 $L/mL\cdot s^{-1}$	0.006	0.006 3	0.007 2	0.008 4

根据喷射压强的平方根和相应压强下流量数据绘制了图 6.9-4，试验曲线显示出喷射流量与喷射压强平方根接近于线性关系，与理论公式吻合。

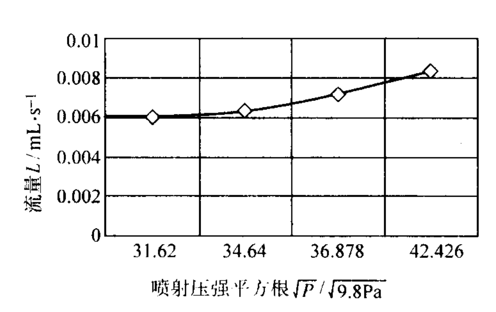


图 6.9-4　流量与喷射压强的平方根之变化曲线

2）喷射频率对喷射流量和成形质量的影响　当喷射压强和喷射占空比确定后，喷射流量与喷射频率的关系如表 6.9-6 所示：

表 6.9-6　不同喷射频率下的喷射流量

（喷射压强 13 328 Pa，占空比 30%）

喷射频率/Hz	100	300	400	500
流量 $L/mL\cdot s^{-1}$	0.005	0.006	0.007 2	0.008 3

根据试验测量数据绘制了流量－喷射频率曲线（见图 6.9-5），该曲线显示出流量和喷射频率成近似线性的关系。喷射频率对流量的影响大于喷射压强对流量的影响。

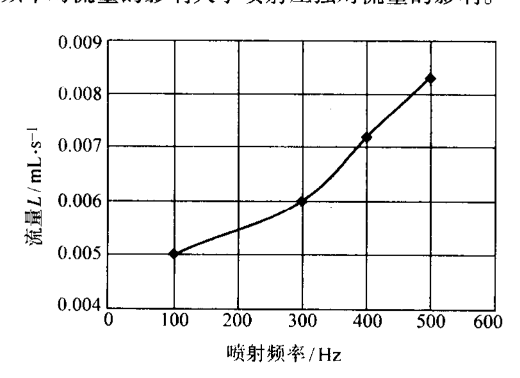


图 6.9-5　流量－喷射频率变化曲线

喷射频率对成形质量的影响效果比较显著（见图 6.9-6），当采用 300 Hz 以下的喷射频率成形时，成形质量不好；最佳的喷射频率是 400～500 Hz；当喷射频率在 500 Hz 以上，成形效果没有改善。由于喷头在正常使用情况下的振动总次数是一定的，为了延长喷头使用寿命，本研究在成形时采取 400 Hz 喷射频率。

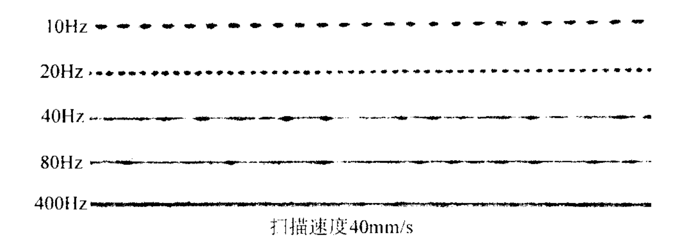


图 6.9-6　喷射频率对成形的影响

3）占空比对喷射流量和成形质量的影响　脉冲的占空比是指一个脉冲周期内高电平与低电平所占用的时间之比。占空比可以控制喷头的动作元件扩张和收缩的时间比值。在喷射频率一定的情况下，占空比决定喷出水滴的大小，占空比越大，水滴也越大。图 6.9-7 所示的是喷射频率为 20 Hz，扫描速度为 80 mm/s 的情况下，不同占空比下喷射的水滴情况。试验结果验证了上述关于占空比对喷射的水滴影响的推论。由于冰型快速成形工艺需要降低流量以提高成形精度的分辨率，同时对喷头施加的驱动电压越长，喷头内部线圈发热量越大，喷头的使用寿命也会越短，因此本研究在工艺试验中采用的喷射占空比为 30%。

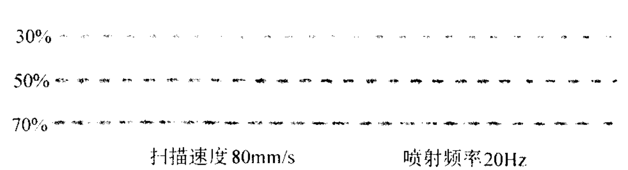


图 6.9-7　脉冲占空比对喷射的影响

喷射流量与扫描速度须相互匹配。由于喷射压强和喷射频率都不易于实现适时控制，因此，应当采用改变占空比的方法来实时改变喷射流量的大小，具体控制方案如图 6.9-8 所示。

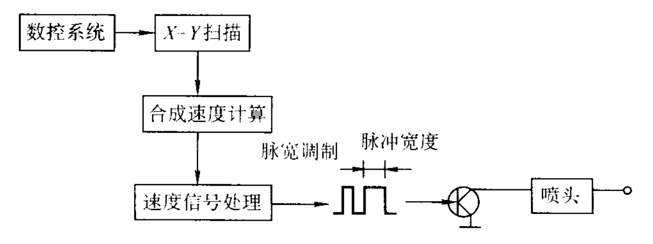


图 6.9-8　流量和扫描速度实时匹配控制原理图

喷头出水量的大小是由控制脉冲的脉冲宽度来决定的，通过 $X-Y$ 轴的合成速度输出相应的脉宽可调的控制脉冲，这样喷头的出水量就和扫描速度相匹配了。一般数控卡都可以将第四轴设成比例轴输出，根据 $X-Y$ 轴的合成速度输出一定频率的脉冲信号。然后采用单片机对输出的脉冲计数，计算扫描速度，最后输出相应脉宽的控制信号，再对此信号进行电平转换，然后控制喷头，从而实现喷射流量和扫描合成速度的匹配。

（2）成形材料

对八种溶液进行了成形性比较，分别为普通自来水、加入少量普通红墨水的自来水、加入少量绿色颜料的自来水、10% NaCl 溶液（质量分数）、10% 葡萄糖（质量分数）、纯净水、去离子水。其中成形性最好的是加入少量绿色颜料的自来水，但由于含有颜料颗粒而容易将喷头堵住，影响成形的连续性；成形质量次之的是加入少量普通红墨水的自来水和 10% 葡萄糖溶液（质量分数），加入少量普通红墨水的自来



水成形质量稳定，对喷头工作没有不利的影响，10%葡萄糖溶液（质量分数）由于含有糖份，溶液在喷嘴处干燥后容易形成较大的黏性，对喷嘴内部阀芯的高频振动产生不可忽视的阻力，使喷头喷射不畅；普通自来水和10% NaCl溶液（质量分数）都具有比较好的成形性；而纯净水和去离子水却无法成形，原因是喷嘴无法对这两种溶液密封，因而在喷嘴处不断有液体渗出，喷嘴处积水，导致无法实现液体的喷射。

通过测试以上材料的黏度、密度和表面张力等性能参数，发现黏度、密度、表面张力在八种材料中均处于中间值的0.4 mL绿墨水+150 mL普通自来水和0.4 mL红墨水+150 mL普通自来水具有最好的成形稳定性；去离子水和纯净水的黏度、表面张力和密度都小于其他溶液，成形性也比其他溶液差；10%NaCl溶液（质量分数）具有最大的黏性和表面张力，但同时也具有最大的密度，所以NaCl溶液综合成形指数不如其他溶液。5%葡萄糖溶液（质量分数）和10%葡萄糖溶液（质量分数）与0.4 mL绿墨水+150 mL普通自来水和0.4 mL红墨水+150 mL普通自来水比较表面张力相差细微，忽略不计，葡萄糖溶液粘度稍大，但密度也明显偏大，综合成形指数比0.4 mL绿墨水+150 mL普通自来水和0.4 mL红墨水+150 mL普通自来水稍差。

由此可见，低温冰型RP工艺的成形质量是由材料黏度、密度和表面张力综合性能指数决定。理论上的解释是：当一滴液滴沉积到成形表面时，其沉积形状受到溶液的黏度、密度和表面张力的影响。黏度对液滴形状具有一定的保持性，黏度越大，液体凝固后的球面半径 R 越小；而密度则会使液滴形状扩张，即密度越大，液滴沉积后的形状球面半径 R 越大；表面张力使液体表面收缩，表面张力越大，形状的球面半径 R 越小。

（3）喷射距离

喷射距离，即喷嘴到成形面的距离对成形质量也有相当大的影响。对不同喷射距离进行一维冰线成形试验，结果如图6.9-9所示。从图6.9-9中可以看出当喷射距离为8 mm时，成形的质量最好，随着喷射距离的减小，成形的冰线逐渐出现宽度和高度方向不太均匀的现象。当喷射距离较大，如10 mm、20 mm、甚至30 mm的时候，则喷出的水滴的方向性得不到保证，聚焦情况不是很好，所以扫描的冰线附近会出现零星细小的冰点，而且喷射距离越远这种情况越严重，成形质量大大下降。

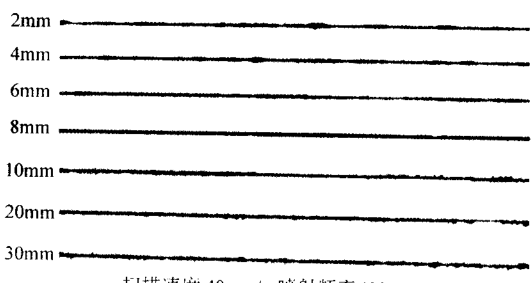


图6.9-9 喷射距离对成形质量的影响
（扫描速度为40 mm/s，喷射频率为400 Hz）

（4）成形环境温度

成形环境温度介于-15～-26℃之间时，喷出水滴能够快速凝固，得到较好的成形质量。当成形环境温度高于-15℃，喷出水滴的凝固速度较慢，在表面张力的作用下，液态的水有相互集聚的趋势。如果凝固速度无法抵消表面张力带来的负面影响，会导致成形的冰线粗细不均，见图6.9-10。当成形环境温度低于-26℃，则由于温度过低喷头内的液体容易凝固，导致喷头无法喷射。因此成形环境温度取能够较好成形的温度区间-15～-26℃的中间值-20℃。

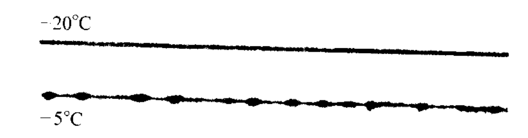


图6.9-10 不同成形环境温度下的冰线成形

1.2.4 工艺参数的优化和成形实验结果

以上讨论了各种工艺参数对成形质量影响的基本规律，只有综合考虑各种因素，对各种工艺参数进行合适的匹配，才能得到最为满意的成形效果。经过反复实验组合优化，确定了实验中合适的工艺参数，如表6.9-7所示。

在表6.9-7所列工艺参数下，成形得到了有一定复杂形状、表面质量较高的各种冰原型件，如图6.9-11所示。

表6.9-7 低温冰型快速成形工艺实验优化的工艺参数

喷射频率/Hz	喷射距离/mm	喷射压强/kPa	扫描速度/$mm \cdot s^{-1}$	占空比	环境温度/℃	初始温度/℃	流量/$mL \cdot s^{-1}$	$\gamma/10^{-4} mL \cdot mm^{-1}$
400	5～8	14.7	80	30%	-20	20	0.007 8	0.975

1.3 低温冰型工艺的应用

成形材料成本低且没有污染是低温冰型快速成形技术的主要优点，在生物制造等领域有应用前景。冰型成形在低温环境，可以很好地保持生物材料的性能，包括某些生物活性物质的活性。同时，冰型以水为成形材料，水对人体无任何毒性，不会对组织支架产生任何污染，可以很好地保证成形过程的无菌性。而且由于水的凝固点比目前用到的生物材料凝固点低10℃，水是最适合做支架悬空部分成形时的支撑，去除支撑时可以简单地将冰融化即可，这是其他工艺的材料无法实现的。

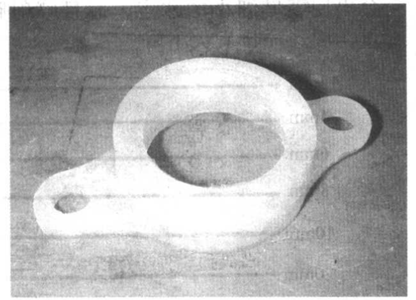
另外绝大多数材料受热升温时体积会膨胀，而水由固态融化成液态时体积是减小的，因而在某些工艺如熔模铸造中“失冰型”时，不会象“失蜡”那样由于体积膨胀导致型壳破裂、铸件尺寸失去精度等。

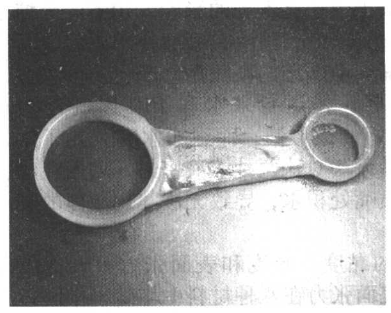
以蜡、ABS或光敏树脂为材料的原型在熔化消失时体积膨胀，常常对陶瓷型壳产生压力，导致型壳变形，留有残余应力，甚至可能导致型壳开裂，影响铸件的质量；而且蜡或ABS原型在熔化消失时易留下残渣，难以清理干净，同时也污染环境。采用水或其他溶液凝固后的固体（统称为冰型）作为熔模精密铸造的母模翻陶瓷型，由于冰型在升温融化时体积收缩，不会对陶瓷型壳产生压应力，不会损伤陶瓷型壳，水和溶液可以通过蒸发的方式去除，故可得到精度高、表面光洁度高的型腔，从而制造出高精度零件或模具，提高生产效率。

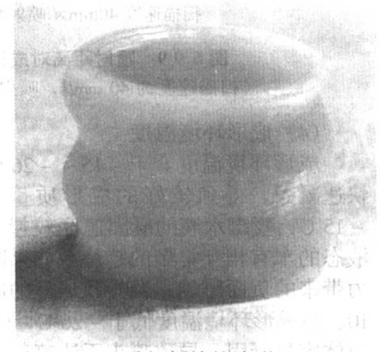
基于冰型的熔模铸造工艺过程如下。

1）采用RP技术完成冰型制作　利用冰型快速成形技术，按照冰型CAD模型直接成形冰型，如图6.9-12a所示。在低于水的凝固点温度的低温成形室中，在计算机控制下，喷嘴按路径喷出水滴，水滴凝固成形，从底部逐层堆积出预想的冰型原型。

2）准备陶瓷浆料　水解硅酸乙酯得到水解液，然后将水解液与耐火材料、催化剂、分型剂放入低温室充分降温，在低温下将以上各种成分按比例混合，搅拌均匀，制成陶瓷浆料。


(a) 轴承座冰型


(b) 连杆冰型


(c) 螺旋管冰型

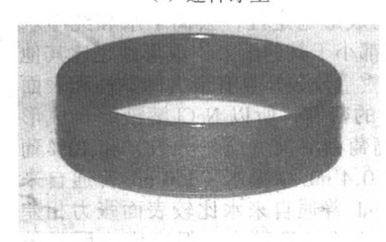

(d) 圆环冰型

图 6.9-11　低温冰型快速成形的典型成形件（清华大学激光快速成形中心提供）

3）灌浆　在低于水的凝固点温度的低温环境中，将涂有分型剂的冰型放置在底板上，罩上随形的泡沫外壳，进行灌浆，浆料填充随形泡沫衬与冰型之间的空间，该步如图 6.9-12b 所示。

4）胶凝　陶瓷浆料在低温下需放置 6 h 左右使浆料充分胶凝。

5）融冰　陶瓷浆料胶凝充分后，取出置于室温下。冰型自然融化，将泡沫壳与陶瓷型壳剥离，从而得到陶瓷型壳，如图 6.9-12c 所示。

6）焙烧　在 550℃烘箱中烘烤。

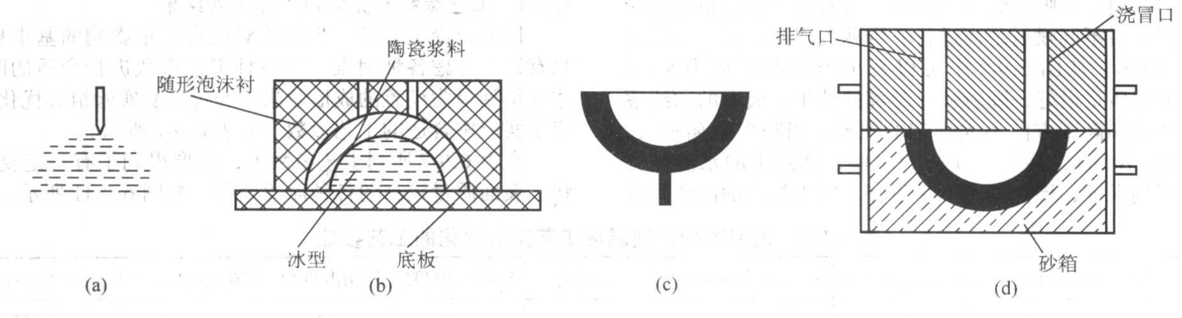
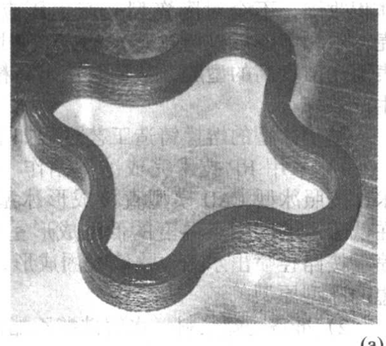


图 6.9-12　基于冰型的熔模铸造工艺原理图

7）浇注　制作砂箱和浇注系统。浇注前，用喷灯将陶瓷型壳内表面加热，减小陶瓷型壳与浇注金属液的温度差，迅速合箱，从浇口浇入熔化的金属直到型腔完全注满为止，如图 6.9-12d 所示。

8）凝固和清理　金属液冷却凝固形成铸件，除去陶瓷型壳，得到铸件。

图 6.9-13 分别为基于冰型的熔模铸造工艺过程中的冰型、陶瓷型、砂型和铸件。



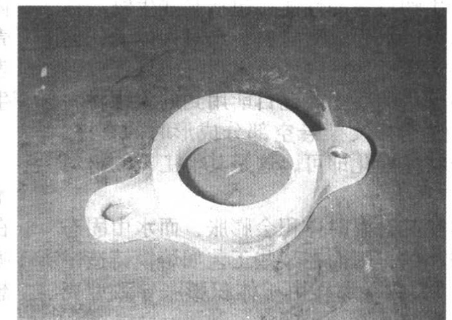
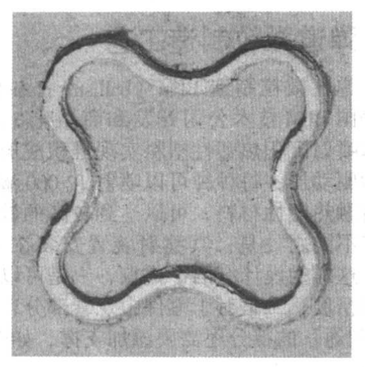
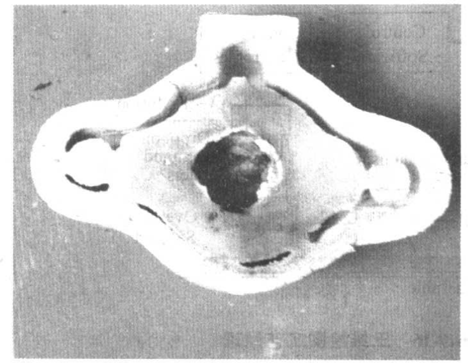
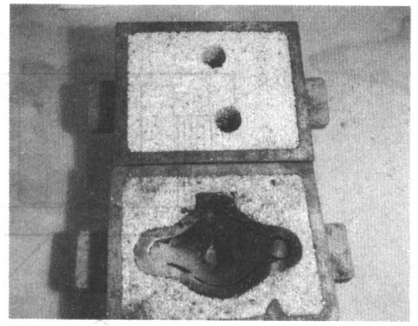

(a) 冰型

图 6.9-13　冰型、陶瓷型、铸件实体图（清华大学激光快速成形中心提供）



(b) 陶瓷型



(c) 砂型



(d) 铸件

续图 6.9-13

2　轮廓成形工艺

轮廓成形工艺 CC（contour craft）是由美国南加州大学 Behrokh Khoshnevis 等人开发的一种类似于熔融堆积成形的工艺，它采用堆积轮廓和浇铸熔融材料相结合的方法来成形，在堆积轮廓时采用了简单的刮刀和刮板式装置，形成原型的层片为准三维。该工艺有两个特点，一是先成形某一层片的外部轮廓，然后在中间部位采用浇铸的方法完成成形，如图 6.9-14 所示；二是在轮廓成形时，该工艺采用一些简单的模具如平面或曲面模板辅助完成外表面的成形，使所成形层片的侧壁可以是斜壁或一些曲面形状。由于成形侧壁的过程中，材料的流动受到模具的一定约束，故而提高了成形零件的外表面质量和精度，消除或部分消除了“台阶效应”。

由于模具的作用，堆积零件的层厚也可以取得较大，同时由于采用了堆积与浇铸相结合的方法，从而大大提高了成形零件的速度。该工艺在成形大型零件方面具有较大的优势，发明者甚至提出用 CC 工艺来成形建筑物和游艇。图 6.9-15 显示了该工艺的成形过程和原型。

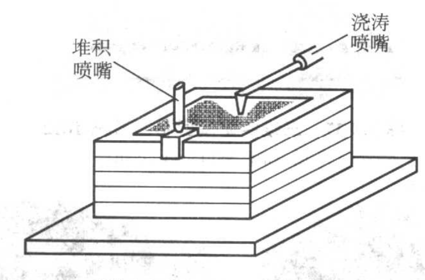


图 6.9-14　CC 工艺示意图

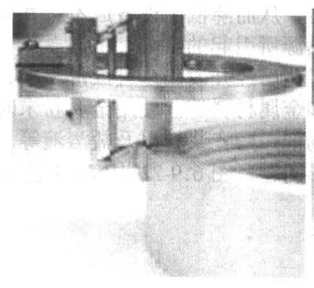
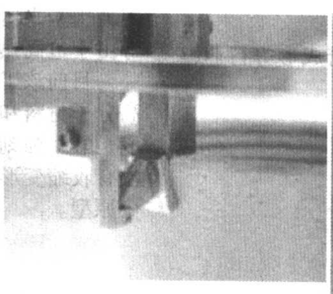
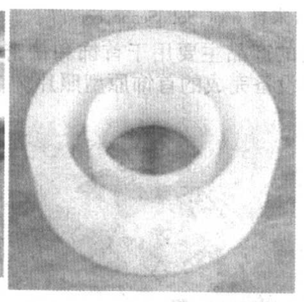




图 6.9-15　CC 工艺成形过程及其原型（来自 www-rcf. use. ecu）

3　三维绘图工艺

三维绘图工艺（3D plotting）是由 Sanders Prototype 公司（后改名为 Solidscape 公司）开发的，该工艺和 3DP 工艺不同，它采用两个微滴喷射喷头分别喷射成形材料和支撑材料完成堆积成形（包括支撑结构），而不是喷射黏度很低的黏结剂（3DP 工艺）。三维绘图工艺与 FDM 工艺最大之不同在于它是采用微滴喷射技术（droplet jetting technology）按需喷射（drop on demand）进行堆积，而 FDM 工艺则是采用连续微流挤出技术。三维绘图工艺的原理是由成形喷头喷出热塑性塑料成形原型本体结构，由另外一个喷头喷出，石蜡作为支撑结构，加工完一层后，经铣刀铣削喷射表面，以保证所要求的层厚，再进入下一层面的制造。工件完成后放入充满煤油的加热搅拌器中，利用煤油将蜡除去，如图 6.9-16 所



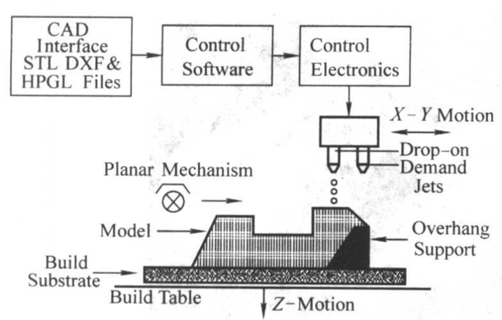


图 6.9-16　三维绘图工艺原理

示。该系统可成形 305 mm × 155 mm × 230 mm 的零件，Z 轴精度可达 13 μm。Sanders Prototype 公司于 1994 年推出 ModelMaker 成形系统。

2003 年 Solidscape 公司推出的三维实体模型制造系统 T612 如图 6.9-17 所示，该设备在零件的成形精度、效率等指标上有了进一步提高，精度可以达到 0.025 mm，喷嘴直径最小可达 0.005 mm。

T612 可以使用多种热塑性材料，制造的零件可以直接用于注塑模。图 6.9-18 为采用 T612 设备成形的箱体零件。

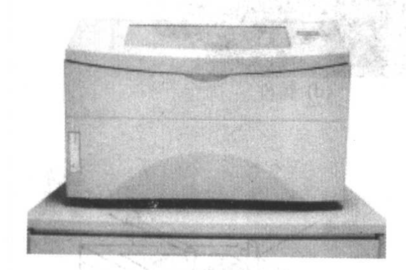


图 6.9-17　三维实体模型制造系统 T612
（来自 www.SolidScape.com）

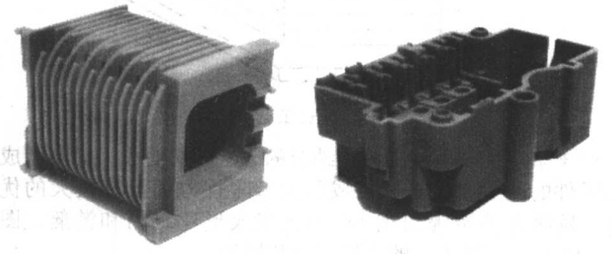


图 6.9-18　T612 成形的箱体零件
（来自 www.SolidScape.com）

Solidscape 公司的产品主要用于首饰和精密成形等行业，图 6.9-19 是采用其设备完成的首饰原型照片。

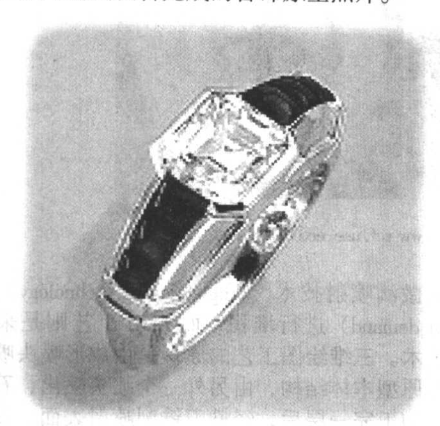


图 6.9-19　采用 T612 完成的首饰原型照片
（来自 www.solidscape.com）

4　弹道微粒制造工艺

弹道微粒制造 BPM（ballistic particle manufacturing）工艺由美国 BPM 技术公司开发和商品化。该工艺采用微滴喷射技术喷射沉积热塑性塑料实现堆积成形。喷头采用压电陶瓷作为驱动器，每秒钟可以喷射 12 000 滴、直径为 0.007 6 mm 的熔融热塑性材料，可以达到较高的效率。和其他快速成形工艺不同之处是：其喷射装置安装在一个 5 轴的运动机构上。这样的设计有两个优点，一是可以消除阶梯效应，提高成形精度；二是对于零件中悬臂部分，可以不加支撑。但对“不联通”的部分还需要添加支撑，如图 6.9-20 所示。

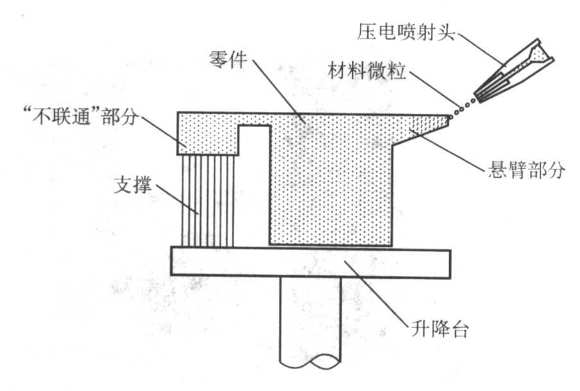


图 6.9-20　BPM 工艺原理示意图

BPM 公司已经倒闭。其经济 – 技术上的原因可能是其采用了 5 轴的运动系统，导致造价较高。

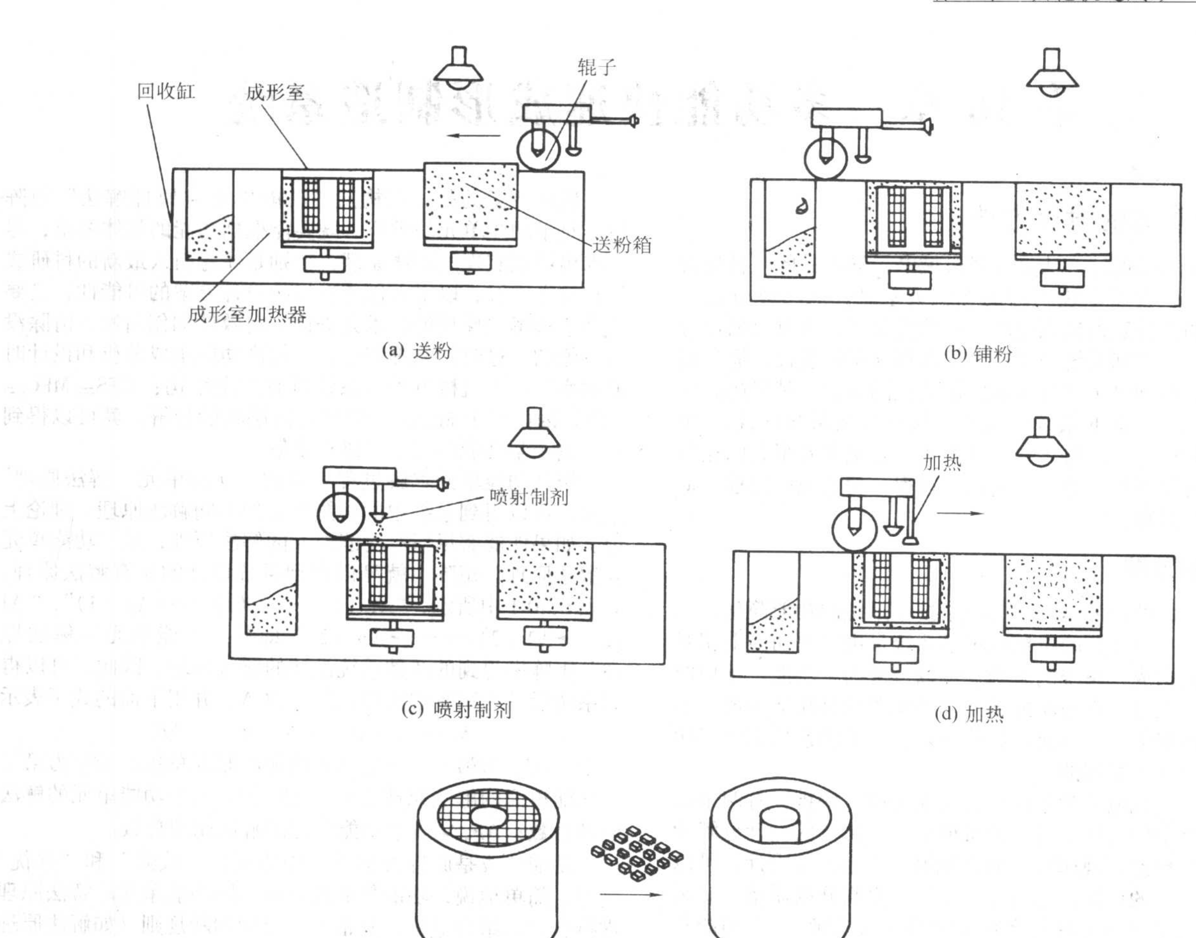
5　选择性抑制烧结 SIS

选择性抑制烧结工艺 SIS（selective inhibition of sintering）是美国南加州大学 Behrokh Khoshnevis 等人于 2003 年提出的一种新的快速成形工艺。其工艺过程如图 6.9-21 所示，送粉箱送出的粉末被铺粉辊子均匀铺在成形室工作平面上（和 SLS 工艺相同），然后采用微滴喷射方式在指定区域喷射抑制剂，最后用热源对该层辐射加热。喷射了抑制剂的区域不能烧结成形，其它区域则烧结而成形。另外，该工艺也可以先逐层完成零件的层面堆积和层内抑制，然后将半成品整体一次烧结，这样可以缩短成形时间。

与 SLS 工艺相同的是，SIS 工艺也具有送粉箱、回收缸、成形室、铺粉辊子、加热器等机构；与 SLS 不同之处在于其不使用激光器，从而降低了设备成本，并减少了收缩、变形等由于过高热源所引起的缺陷。

目前该工艺已经开发出多种成形材料，包括各种热塑性高分子材料和金属材料等。使用金属粉末时的烧结抑制剂可以是酸、蚀刻剂、陶瓷浆料以及盐溶液等。烧结过程中基本没有收缩变形问题。图 6.9-22 为 SIS 工艺示意图及成形的部分原型。





(a) 送粉 (b) 铺粉

(c) 喷射制剂 (d) 加热

(e) 取出零件

图 6.9-21 SIS 工艺成形过程

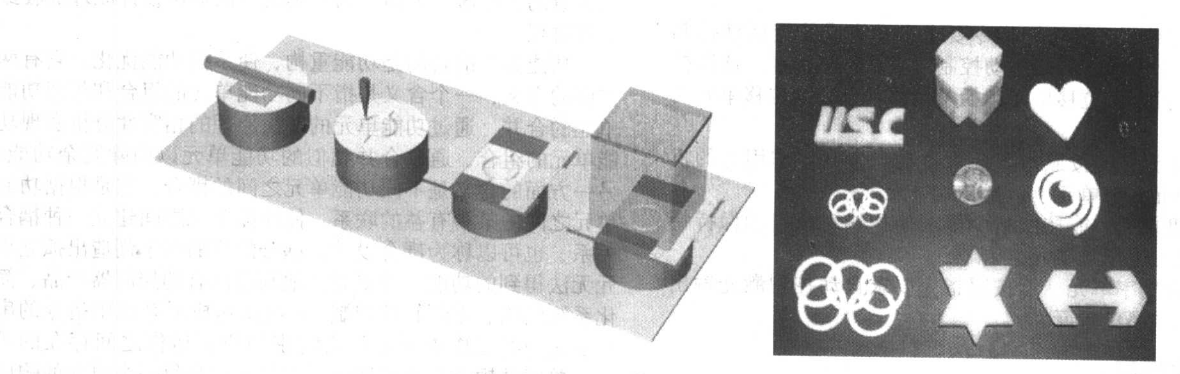


图 6.9-22 SIS 工艺示意图及成形的原型

编写：吴任东（清华大学）



第 10 章　多功能快速成形制造系统

1　功能集成的设计方法

功能集成的设计方法是针对机械电子学产品的一种独特的分析方法，它以系统工程的思想为基础，从功能分析入手，通过功能分解得到机械电子学功能单元，再有目的地进行功能集成，得到系统的设计方法以指导系统设计，通过创造性设计，得到满足多种功能的创造性的解法。其目的是提高系统的功能，降低系统的成本，从而提高系统的性能/价格比，这种设计方法与离散－堆积成形思想有着很大的相似性，功能分解过程类似于”离散”过程，功能集成过程类似于“堆积”过程。

1.1　功能分解

功能分解的目的是为了将复杂技术系统的功能简化，以利于求解。一个复杂的机械电子学系统是由多个功能上相对独立的单元构成，系统的总功能可以分解为子功能、子功能又可以进一步分解直至功能单元。功能单元是功能的最基本单位，即机械电子学单元，其特点是：由单因素控制单一功能，是可以直接求解的。

对一个机械电子学系统进行功能分解（解耦）有两个目的：①将复杂的规律不明显的机械电子学系统的设计分解为由多个较简单的、规律明显的机械电子学单元的设计，可以大大简化产品的设计，加快开发速度，提高开发质量。②可以对机械电子学单元进行多种方案设计（求解），为功能集成设计提供更多的可选方案，以增大创造更好的设计方案的可能性。

按照功能区别，常见的功能单元即机械电子学单元有以下几种：

1）位移单元　能按照指令要求自动完成特定运动控制的机械电子学单元，其中运动控制可以是位移控制、速度控制或加速度控制。位移单元包括角位移单元和线位移单元两类。

2）力单元　能按照指令要求自动产生一定作用力的机械电子学单元，力单元也包括转矩单元。

3）温度单元　能按照指令要求使加热对象自动保持特定温度的机械电子学单元。

4）激光功率单元　能按照指令要求自动控制激光输出功率的机械电子学单元。

1.2　功能集成

假设总功能经过 m 次功能分解后共得到 p 个功能单元，设为 F（1）、F（2）、…F（p）；每个功能单元又有 q 种（q 是最大值，可能有许多功能单元的解法小于 q），设为 A（1）、A（2）…A（q），原理解法不足 q 的可认为是零。由此，根据功能单元和解法原理，可以构造“功能单元－解法原理”矩阵。如表 6.10-1 所示。

表 6.10-1　构造“功能单元－解法原理”矩阵

功能单元	解法原理			
F（1）	A1（1）	A1（2）	……	A1（q）
F（2）	A2（1）	A2（2）	……	A2（q）
……	……	……	……	……
F（p）	Ap（1）	Ap（2）	……	Ap（q）

应该注意的是，在构造“功能单元－原理解法”矩阵时，对于功能单元的求解，既要能根据功能的具体要求，尽量求出可以实现的解法原理，特别是注意引入最新的科研成果和技术手段，以增大创造更好的设计方案的可能性；又要严格考察解法原理的技术先进性、时效性和创新性，清除没有价值的、过时的原理解法，以提高功能集成分析和设计时的效率。由于机械电子学系统具有三层结构：MES⇒MEC⇒MEE，因此对于 MES，一般经过两层功能分解，就可以得到机械电子学功能单元，并进行求解。

根据功能单元求解过程建立的“功能单元－解法原理”矩阵，可以得到系统中的功能单元的不同解法原理。理论上说，如果能够穷尽所有功能单元的解法原理，从“功能单元－解法原理”矩阵中就可以得到系统设计的所有解法原理。如表 6.10-1 中所示，“A1（1）→A2（1）→…Ap（1）”，“A1（2）→A2（2）→…→Ap（2）”即从“功能单元－解法原理”矩阵中得到的两种系统设计的解法原理。因此，可以得到系统设计的所有解法原理的个数 N，并用下面的式子表示

$$N = NF_1 \times NF_2 \times NF_3 \times \cdots \times NF_p$$

式中，NF_1 为第一个功能单元的解法原理总数；NF_2 为第二个功能单元的解法原理总数；NF_3 为第三个功能单元的解法原理总数；NF_p 第 p 个功能单元的解法原理总数。

功能集成是原理方案设计中重要的“收敛”和“寻优”过程。简单地说，功能集成就是将不同功能单元的解法原理进行合理的组合重构，并根据一定的判断规则（如解法原理的相容性判据），将不合理的解法原理的组合方案筛去，得到较少的系统设计的解法原理的合理组合方案，再根据相应的原理设计的评价准则，在这些方案中进行寻优，直至收敛到满意的设计解。因而，功能集成可以加速设计原理的收敛求解过程。

功能集成的目的是功能重构，使系统功能优化。它有两方面的含义：一个含义是指不同功能单元的组合和相似功能单元的合并，通过功能单元的解法原理的相容性分析实现功能单元的组合，通过合并相似的功能单元以消除冗余功能。另一方面的含义是不同功能单元之间的耦合，它是根据功能单元之间的某种有益的联系，使功能单元之间建立一种耦合关系，也可以称为耦合设计。耦合的目的在于创造出孤立单元无法得到的功能，并更充分地利用已有的控制器产品、简化系统结构、方便软件控制，解决快速成形系统中指令的串行发送与各工作单元必须实时密切协调运作之间存在的矛盾。单元的耦合必须根据成形工艺要求和每一个单元的响应特性进行。

2　基于功能集成的多功能快速成形系统

2.1　单一与复合的离散－堆积原理

当前国内外根据离散－堆积原理形成的 RP 技术和方法均是采用一种堆积方法（需要一种相应的离散方式的支持），仅能完成一种成形工艺的技术和方法。究其原因，除了专利保护的因素外，还有研究者和开发厂商被禁锢在单一离散和单一堆积的范畴内的缘故。实际上，根据前述离散－堆积原理是可以进行“复合离散”与“复合堆积”的：即在一个 RP 的数据处理和工艺规划软件中，可以完成支持多种工艺要求的离散处理，尽管不同 RP 工艺在支承结构、成形方向、分层技术和扫描路径规划方面存在差别，但还是可以在

一定的理论指导下将它们和谐地统一起来，且可在一个成形设备中可完成多种形式的单元堆积。事实上，离散–堆积的原理是支持这种复合处理的：可以将一个实体离散成面，进而再离散成线和点，当然也可既离散成面，又离散成线和点；将已有的面堆积成形与先将点堆积成线进而获得面，然后面、面迭加成形，从堆积成形原理的角度分析是相同的。显然，并不是将数种离散处理放在一个软件系统中就成了复合离散；也不是在一台设备中设计两种堆积方法就成了复合堆积，而是需要一个统一数据处理模型，在复合的数据处理框架下完成离散处理；需要在统一的机械电子模型和结构模型的支持下才能完成复合的堆积过程。

2.2 单元技术的简单集成

所谓"单元技术简单集成"是指在工艺创新原则的指引下，巧妙地采用各单元技术创造出一种工艺，一种前所未有的 RP 工艺，显然这是一种发明创造的过程。这种集成考虑的因素较为单一，即这些单元技术的互相支持和融合都是围绕一种新工艺的实现。

任何一种先进制造技术总是在基础技术、传统加工技术中融合使能技术（Enable Technique）发展起来。上述相关的技术统称为单元技术。快速原型技术涉及到的单元技术为：

1）基础技术 如 CAD、运动控制（NC 技术）、新材料、残余应力分析与消除等。

2）传统加工技术 切割、粉末冶金、连接、精密铸造等。

3）使能技术 激光技术（Laser Technique）、微滴技术（Droplet Technique）。所谓使能技术，不仅具有关键技术的含义，更有如下意义：只有在此技术对其他单元技术的支持下，只有该技术集成到相关的单元技术群中去才能使得该项新技术得以成立；它不仅是新技术的关键，更提升了其它单元技术，使之具有更新的应用、价值和含义。激光技术或微滴技术与上述单元技术相融合就形成了当前占主导地位的两大类快速原型技术，目前所有的 RP 技术不是采用激光技术就是微滴技术。

现在摆在设计者和研究人员面前的问题是单元技术如何集成形成 RP 技术。国内外现行的情况是进行单元技术简单集成而形成单一的 RP 工艺，通过单一功能的 RP 设备来实现。多功能快速成形系统是根据复合离散–堆积成形的原理，通过单元技术复杂集成，完成多种 RP 工艺的 RP 系统（设备）。

2.3 单元技术的复杂集成

"单元技术复杂集成"是指在系统创新和工艺创新两原则同时指引下，巧妙地采用各种单元技术，使多种 RP 工艺得以在一个系统中实现，这种 RP 工艺一般是已有的工艺之改进或全新的。这种发明创造过程不仅考虑工艺创新，还要考虑系统的创新。这种集成需考虑的因素较多：既有各种 RP 工艺同一性的提取和工程冲突的化解；更有统一的数据处理模型和功能模型的研究，因而称为"单元技术复杂集成"。这些单元技术的互相支持和融合则是围绕数种新工艺的实现。单元技术简单集成与复杂集成如图 6.10-1 和图 6.10-2 所示。

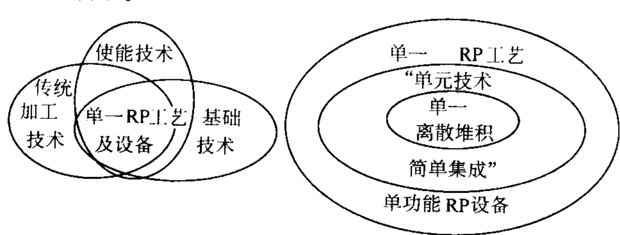


图 6.10-1 "单元技术简单集成"形成单一的 RP 工艺和设备

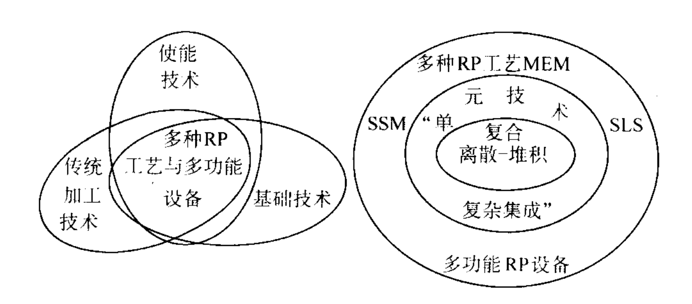


图 6.10-2 "单元技术复杂集成"形成多种 RP 工艺和多功能 RP 设备

具体到哪些 RP 工艺值得集成一起，仅从原理上分析是不够的，还须进行"互补性"、"共用性"和"共享性"分析。RP 工艺的互补性、机械结构和控制系统的共用性和数据处理资源的共享性的关系由图 6.10-3 所示。

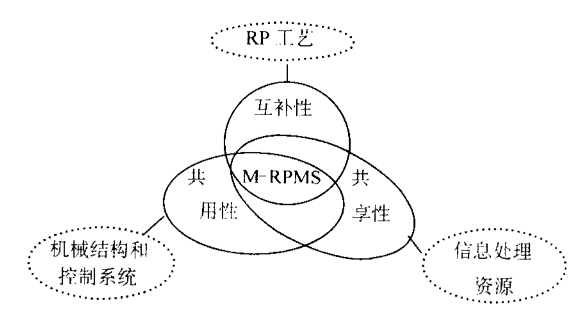


图 6.10-3 RP 互补性、共用性和共享性关系图

互补性、共用性和共享性的交集即多功能快速成形系统 M – RPMS（Multifunction-Rapid Prototyping Manufacturing System）。

2.3.1 互补性

各种商品化 RP 工艺都是为满足某种需求，在特定的材料及应用背景下发展起来的。很明显将不同的 RP 工艺集成起来必然可以满足更为广泛的需求和采用更多种类的材料——RP工艺互补性。

SSM 采用箔材并沿二维曲线切割已有的二维平面材料，无需由点到线到面地建造层面，因而具有很高的成形效率。但如果制造中空薄壳原型则会浪费大量的材料，故适宜制造实心块体状原型。MEM 工艺是通过挤压喷射材料"逐点"堆积起来，因而不适宜制造实心块体（效率太低），而宜于中空壳体原型。如果将 MEM 和 SSM 集成起来则对中空和或实心原型均有很好的适应能力，如表 6.10-2 所示。

表 6.10-2 SSM 和 MEM 比较表

工艺	适合的原型	材料	效率
SSM（LOM）	实心块体	涂覆纸、陶瓷和金属箔材	实心块体效率高
MEM（FDM）	中空壳体	蜡、ABS、尼龙等热熔性材料	中空壳体效率高
SSM/MEM（LOM/FDM）	实心或中空状	上述各种材料	实心和中空状原型均有较高的效率

从制造薄壁中空状原型的角度，SLS 和 SLA 均有类似的特点，是否应将这两种工艺也集成进去呢？这还要分析共用性的问题。

2.3.2 共用性

完成对材料二维处理的任何一台 RP 设备在机械结构和控制系统上均应具有如下部件：

1) $X-Y$ 扫描系统（机械结构及控制系统，扫描速度与其它物理量的匹配）；

2) Z 向升降台（机械结构及控制系统）；

3) 温度测控系统（传感器、加热或冷却元件及控制系统）；

4) 成形室（具有排烟装置和气氛控制，保持特定温度及该温度的最小波动的空间以及相应的控制系统）；

5) 床身（要求经有效时效处理，具有很好的刚度和吸振性能的框架。上述各部分以及材料处理和材料输送部分的机械结构和部分控制系统均需组装在床身上）。

上述五个部件应作共用性考虑和设计，使之对多个二维 RP 材料处理系统均可适用。

不同的 RP 工艺在其材料处理和材料输送装置方面具有明显的差异性，这是 RP 工艺集成遇到的最大问题。商业化的 RP 工艺其材料处理及输送装置要求见表 6.10-3。

表 6.10-3 常见的 RP 工艺材料处理及输送装置表

序号	材料处理特点	材料输送特点	特殊要求
1	SL 工艺：波长为 325 Nm 紫外激光，处理光固化液体，使之聚合成大分子量的固体	盛满一定量光固化树脂的容器	液面测高，调节系统；刮平系统，激光功率检测系统
2	SSM 工艺：波长 10.6 μm CO_2 激光，处理（分离）箔材	箔材的输送和收取	扫描速度和激光功率匹配装置；箔材张力自动调节系统；热压系统；测高系统
3	SLS 工艺：波长为 10.6 μm CO_2 激光，处理（溶化－烧结）粉末	粉末输送和收取容器	粉末铺平，压实系统
4	MEM（FDM）工艺：熔化丝材并挤压出喷嘴	将丝材从卷轴上牵引出来并推入熔化器	扫描速度与丝材推入速度匹配喷射阀的响应速度，测高系统
5	Genisys 工艺：块状片材熔化并挤压出喷嘴	块状片材的储存及导入熔化器系统	扫描速度与片材推入速度匹配装置
6	Ink－jet 及 BPM 工艺：将熔融状材料喷出喷嘴	材料熔化并保温输送到喷嘴	喷嘴检堵系统，铣平系统
7	3DP 工艺：喷射黏结剂黏结材料	粉末输送及收取装置	粉末铺平和压实

分析表 6.10-3 可以得出如下集成观点。

1) 从采用激光器的 RP 工艺（序号码 1～3）和采用微滴技术的 RP 工艺（序号 4～7）各选出一个具有代表性的 RP 工艺，作为 RP 工艺集成的基础。

2) 序号码 1～3 中选用 SSM，这是因为 SSM 与 SLS 采用相同的 CO2 激光系统，热压箔材装置也很易与粉末压实铺平系统合成一个统一的装置，SSM 工艺辅助装置少，容易在其上再集成其它工艺装置。

3) 序号 4～7 中选用 MEM 工艺，MEM 工艺材料处理和输送装置均有很好的典型性和代表性，容易设计成模块化结构。

将 SSM 与 MEM 集成起来形成一个多功能的 RP 工艺平台，再根据需要还可将其它 RP 工艺集成上去形成更复杂的 RP 工艺。

共用性的实现是由统一功能模型和统一结构模型来保证的。

2.3.3 共享性

共享性是指不同 RP 工艺对信息资源的共享程度。显然，基于 STL 模型的三维工艺规划子系统对不同的 RP 工艺来讲，基本上是相同的，不同工艺可能仅用到这些功能集合的一部分。不同 RP 工艺其 CAPP 之特点和差异主要体现在扫描路径规划上，这将建立填充扫描路径规划统一模型来解决。

3 统一模型

进行复合的离散－堆积和“单元技术复杂集成”的前提是建立统一的模型，包括：统一数据处理模型、统一的功能模型和统一的结构模型。

3.1 统一数据处理模型

不同的工艺对离散的要求不同，如 SSM 只需离散到层；而 MEM 需对轮廓以内的层面进行填充，因而需离散到线。堆积时也很不相同，SSM 仅需将相邻两层连续粘接（堆积）起来；而 MEM 填充的过程实际上是线间的并行连接过程。这些不同的要求反映到数据处理过程就会有很多差异，为此必须建立统一的数据处理模型，作为信息集成的统一框架。用于复合离散的“适应性快速 RP－CAPP”就是建立在统一数据处理模型基础上开发的，其组成结构见图 6.10-4。正如前述，不同 RP 工艺数据处理的特点主要体现在扫描路径的生成和规划方面，必须从这点出发来考虑数据处理需要“统一”的方面。扫描路径生成和规划的主要内容为：理想轮廓线的补偿、生成填充轮廓线、区域扫描填充方式的设计和扫描路径顺序的规划。

3.1.1 理想轮廓线的补偿

与铣削加工中刀具半径补偿类似的原理，在 RP 扫描中需对理想轮廓线进行偏移补偿。在统一数据处理模型中比较重要的是需考虑不同 RP 工艺偏移补偿方向之不同性。

SSM 工艺应采用激光切割零件实体区域以外的部分，以保证实体区域不被切割，为此，应将激光扫描线从理想轮廓线向实体区域以外移动一定距离，其值为光斑的半径。MEM、SL、和 SLS 是用“线填充成面”，因而扫描线应向零件实体区域内偏移，其值为扫描线之半径，否则成形件就会变大，见图 6.10-5。这种相反方向之偏移在单一离散中是不存在的。

3.1.2 生成填充轮廓线

填充线的边缘界线称为填充轮廓线。对 MEM 工艺来说，通过填充来堆积材料，因而填充是在零件实体区域内进行。SLS 和 SL 工艺均与此相同。而 SSM 工艺则不同，“填充”是为了切割零件实体区域以外的部分，以便于将零件实体部分与废料部分分开，如图 6.10-5 所示。对于 MEM、SLS 和 SL 工艺来说，一般在同一点处不应扫描两次（否则造成材料的

STL 文件
基于 STL 模型的三维工艺规划子系统
文件功能　基本工艺规划功能　高级工艺规划
读文件并建立边界表示
保存文件
显示
平移、旋转、缩放
检验修复
分层
STL 模型排样合并
STL 模型分割
选择性添加局部支撑
轮廓 CLI 文件
基于 CLI 模型的二维工艺规划子系统
文件功能　基本工艺规划功能　高级工艺规划
读文件并建立拓扑表示
保存文件
显示
平移、旋转、缩放
检验优化
本体扫描路径规划
支撑扫描路径规划
CLI 模型排样合并
特殊层片扫描路径规划
选择性支撑扫描路径规划
工艺 CLI 文件
工艺规则制订信息管理子系统
工艺规则　基本设备参数　STL 模型管理
分层规则
本体扫描规则
特殊层片扫描规则
支撑扫描规则
工作空间尺寸
坐标系
刀具直径
存储 STL 模型
删除 STL 模型
查询 STL 模型
数据库系统
设备和工艺条件　工艺经验　加工要求
工艺研究　图形交互技术　计算几何技术　几何模型表示技术　数据库技术　软件技术

图 6.10-4　适应性快速 RP－CAPP 系统的组成

理想轮廓线
零件实体区域
光斑直径
实际轮廓线
填充轮廓线
SSM
扫描线直径
实际扫描轮廓线
理想轮廓线
零件实体区域
填充轮廓线
MEM

图 6.10-5　不同工艺的扫描偏移补偿方向示意图

过堆积；而 SSM 工艺仅是采用激光“刀”切割材料，则不存在此种过堆积问题。不同工艺扫描轮廓线的线宽不同，过堆积的影响也不相同，故填充轮廓与实际扫描轮廓之间距也是不同的。上述这些差别都应考虑到统一数据处理模型之中。

3.1.3　生成区域扫描填充线

不同工艺对填充线的具体生成方式要求不同。对 MEM 工艺来说，由于喷头的惯性远大于其它任何一种工艺的扫描



运动部分，因而在启停响应处理不当时很易造成“脱离”和“节瘤”问题。因而常采用偏置填充与栅格填充相结合的办法，如图 6.10-6 所示。

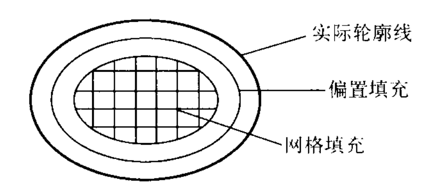


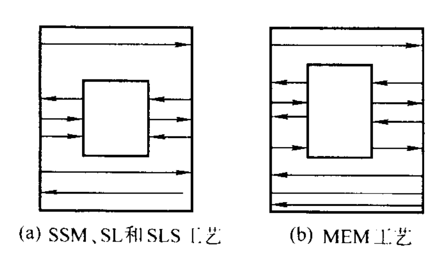
图 6.10-6　MEM 填充方式图

SSM 工艺的填充要求较高的智能，一般采用正交格线，但其密度是很有讲究的，在废料难以取出处则应更密一些。为了减少和控制残余应力，在一些关键部位则应在先于其它区域进行切割扫描。

SLS 填充扫描时的路径和激光功率的调配对控制残余应力从而减少变形是非常重要的。

由此可见，为了保证工艺集成，必须在全面分析各工艺在填充扫描要求方面的差别，并设计一个统一的模型来加以保证。

又如对待内孔处扫描填充处理方式是不同的，对 SSM、SL 和 SLS 来说由于激光启停响应迅速，为提高速度常采用直接越过内孔边缘，仅关闭（或开启）激光，如图 6.10-7a 所示。



(a) SSM、SL和SLS 工艺　　(b) MEM 工艺

图 6.10-7　不同工艺对待内孔的不同处理方式

而 MEM 工艺喷头关闭响应速度较慢，若采用图 6.10-7a 方式扫描则在孔边缘会出现“节瘤”，严重影响表面质量，因而采用图 6.10-7b 方式。

对平行于分层方向的零件非顶层自由表面来说，SSM 工艺的扫描间距应大一些，以提高表面质量；而 MEM、SL、SLS 工艺与 SSM 相反则应更密一些。

3.1.4　扫描路径规划统一模型

针对每一种具体的工艺设计的数据处理即前述单一的离散，不但效率低下，更为重要的是各工艺难以在一台设备上集成。必须采用复合离散的原理，抓住各工艺之共性并充分考虑它们的特点，设计扫描路径规划统一模型，其核心是扫描路径规划的统一规则，如表 6.10-4 所示。

表 6.10-4　扫描路径的统一规则

规划内容		选择	输入项	取值范围
实体轮廓补偿		有/无	扫描头半径	
			方向	内/外
工艺边框		有/无	边框长宽	
实体内部扫描填充方式	偏置扫描	有/无	偏置距离	
			偏置次数	
			全部偏置	是/否
	栅线 1	有/无	与 X 方向夹角	0°～180°
			间距	
			线型	虚/实
			实线段长度	
			空程长度	
	栅线 2	有/无	与 Y 方向夹角	0°～180°
			间距	
			线型	虚/实
			实线段长度	
			空程长度	
实体外部扫描填充方式	偏置扫描	有/无	偏置距离	
			偏置次数	
			全部偏置	是/否
	栅线 1	有/无	与 X 方向夹角	0°～180°
			间距	
			线型	虚/实
			实线段长度	
			空程长度	
	栅线 2	有/无	与 Y 方向夹角	0°～180°
			间距	
			线型	虚/实
			实线段长度	
			空程长度	
路径连接方法		有		Z 字形交叉换向沿轮廓

通过对统一规划的各个属性取不同的值，灵活组合，可以产生适合不同工艺需求，适应不同扫描阶段，不同材料特性的扫描路径形式，以满足不同工艺不同成形件的具体要求，从数据处理这个基本方面保证在多功能快速成形系统上的工艺集成。

上述扫描路径规划统一模型的求解主要涉及两个基本的计算几何问题：

1）平面多边形区域的拓朴表示；

2）扫描路径规划的单元操作。

根据统一数据处理模型开发了工艺规划和数据处理软件系统——RP－CAPP，该软件系统能很好地支持多种成形工艺，可处理任意规模的 STL 文件，分层速度快。具有强大的显示、纠错、修复、分割、拼合和自动生成拼合面结构和编辑功能。RP－CAPP 除拥有一般支撑结构生成功能外，还拥有整体支撑功能，它使 MEM 件的变形减小到最低限度，这是世界上其它同类软件所不具备的。

3.2　统一功能模型——机械电子学模型

3.2.1　基本概念

RPM 设备（快速原型制造设备）是一种典型的机械电子学产品，根据机械电子学的观点，机械电子学产品是一种机械电子学系统（Mechanical Electronics System—MES），它是由“机械电子学组件”（Mechanical Electronics Component—MEC）通过计算机软件集成。而 MEC 是由“机械电子学单元”（Mechanical Electronics Element—MEE）耦合而成。即 MEE 耦合成 MEC，而 MEC 集成 MES。

MEE 是具有信息处理能力，通过自动控制完成一特定物理功能的基础单元。它是由控制体（C）、驱动体（D）、执行

体（M）和传感系统（S）组成的有机整体，它是单因素控制单个物理量的基础机械电子学单元，如图 6.10-8 所示。

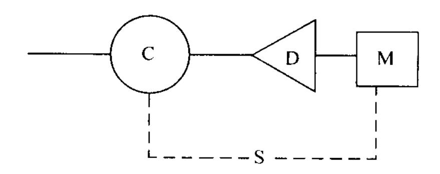
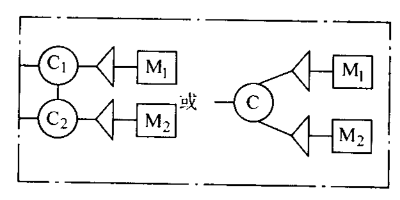


图 6.10-8　MEE 结构图

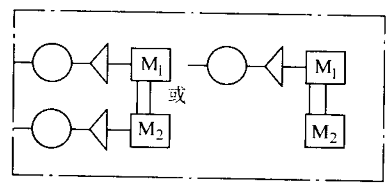
MES 所需完成的物理功能是千变万化的，然而对于一个机械电子学产品来说它总是由有限的数种 MEE 通过各种耦合方式形成功能复杂的 MEC，再通过信息集成形成功能强大的多姿多彩的 MES。

将一个复杂的系统进行"解耦"，即将各种互相耦合在一起的因素分开，将多因素控制降阶为单因素控制，这是一种创造过程。从 MES ⊠ MEC ⊠ MEE 就是一种典型解耦过程。从 MES 的终极功能出发，进行解耦分析，直至获得各种单功能的 MEE，这是高技术机械电子学产品设计的第一个关键步骤。

显然，将 MEE 耦合成 MEC ⊠ MES 更是一种创造过程，是比解耦更为基本的创造性过程。传统的机械设计将零件"耦合"成部件，再组装成机器。这种纯机械式的耦合也能创造出功能复杂的机械设备。然而这是一种缺少柔性的刚性耦合，结构复杂，重组性差。根据机械电子学的观点，对 MEE 通过控制体和执行体均可进行耦合，然而前者是主要的，图 6.10-9 为通过控制体或执行体耦合的符号图。实际上，各 MEE 控制体的硬件都大体相同，仅改变其软件就可满足不同耦合的要求，实现不同的物理功能。由 MEE 耦合成千奇百态的 MEC 将成为机械设计的基本技术路线。这种耦合方式柔性极高、重组性强，设计周期短。由 MEC 集成为 MES 的过程是强化上述特点的过程。



(a) 通过控制体耦合



(b) 通过执行体耦合

图 6.10-9　RP 通过控制体或执行体耦合的符号图

通过控制体的耦合方式有比例耦合（耦合各方根据第三方的要求按某一可变比例关系同时运行，如插补控制），协同耦合（被耦合各方按一协同关系独立运行），跟踪耦合（一个量的变化完全依据另一个量的变化），互锁耦合（被耦合各方互为因果关系）。

3.2.2　功能集成的机械电子学原理

从机械电子学的观点分析，所谓单元技术的集成归根到底实际上就是 MEE 耦合成 MEC 再通过软件集成为 MES 的过程。每一台单一功能的 RPM 设备正是通过这种耦合（以及集成）来实现其某种 RP 工艺的。显然，完全可通过大体相同的 MEE，主要通过各种的耦合而增加更多的功能以完成一台 RPM 设备上实现多种 RP 工艺，这就是 M－RPMS 功能集成的机械电子学原理。SSM 和 MEM 的 MEE 耦合图如图 6.10-10a、b 所示。

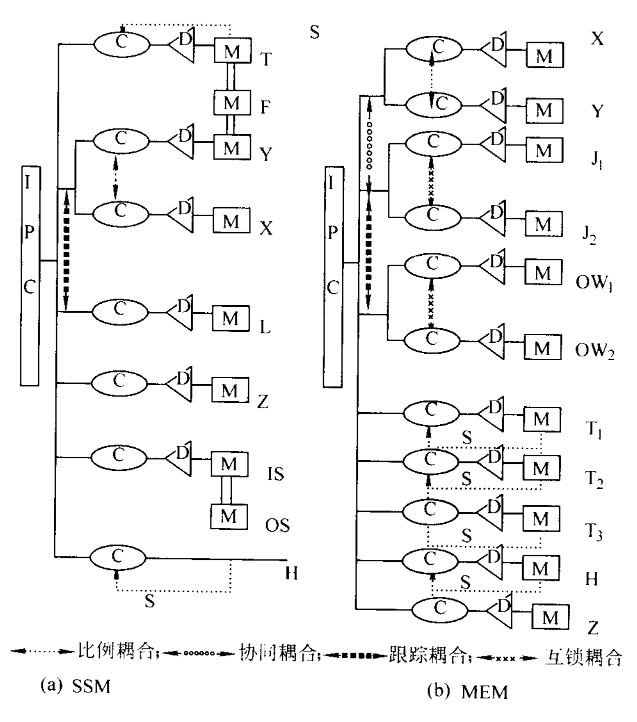


图 6.10-10　SSM 和 MEM 的 MEE 图

图 6.10-10a 中，X，Y 为位移单元，通过比例耦合（←·······→）实现插补控制（平面扫描），再与激光单元 L 实现跟踪耦合（←······→），以完成激光的功率与扫描速度和运动轨迹匹配（包括开断控制）。F 为箔材压实单元，它与 Y 轴共用一个 MEE，这是由于它们在运动方向和时序上均无矛盾，可以共用的缘故。T 为温度测控单位，用以检测和控制箔材加热的温度，T、F、Y 半永久性地机械连接在一起。Z 为升降控制单元。IS 为箔材输入单元，OS 为箔材输出单元，它们之间用特种机械相联接。H 为测高单元。上述各单元通过工控机 IPC 耦合为一个 MES。

在图 6.10-10b 中，X，Y 仍为位移单元，通过比例耦合实现插补控制。J_1 和 J_2 分别为造形喷头和支撑喷头单元，它们之间具有互锁关系（<-xxxx->），J_1 工作时，J_2 关闭；反之亦然。送丝机构 OW_1 与 OW_2 之间也是互锁关系（<-xxxx->），它们与喷头 J_1 和 J_2 之间均为跟踪耦合（<-·······>），喷射的快、慢和启停唯一地决定了送丝的速度和启闭状态。J_1、J_2 和 X、Y 扫描之间是一种较为复杂的协同耦合关系（←○○○○○○→）。J_1（J_2）截止阀门开启或关闭并不是简单根据 X、Y 的坐标，还与扫描曲线之曲率、速度、材料种类和在成形件上的实际位置等有关，X、Y 扫描机构只保证 J_1（J_2）的几何位置；而 J_1（J_2）的截止阀是否打开还需考虑上述诸多因素，因而 X、Y 扫描与 J 之间为复杂之协同耦合关系。T_3 为成形室的温度测控单元，T_1 和 T_2 分别为喷头 J_1 和 J_2 熔池的温度测控单元，H 为测高单元。

将图 6.10-10a 和图 6.10-10b 集成起来就成为具有两个功能（SSM 和 MEM）的多功能快速成形系统 M－RPMS 的 MEE 图，见图 6.10-11。这就是 M－RPMS 的统一功能模型——机械电子学模型。采用这种模型进行集成是非常方便的，只要用图 6.10-10a 中的 Y 单元系统置换图 6.10-10b 的 Y 单元，

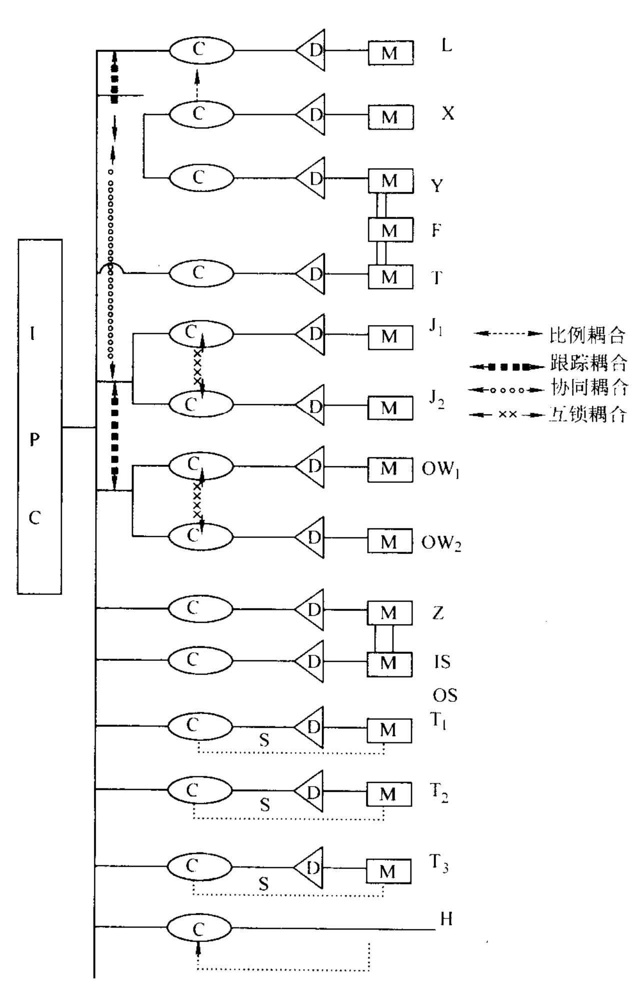


图 6.10-11 M－RPMS 的 MEE 图（机械电子学模型）

同时将图 6.10-10a 中的 L 和 IS、OS 单元加入图 6.10-10b 中，在同一 IPC 的管理与控制下即成，可见机械电子学模型是设计多功能快速成形系统有力武器。

图 6.10-11 的细化则为图 6.10-12。

SSM 和 MEM 工艺不可能同时进行，显然分别用于此两工艺的 T（热压板加热和温度测控系统）和 T1（喷头 1 的加热和温度测控系统）不可能同时运行，因而它们的控制体 C——温控器是可以共用的，见图 6.10-12。

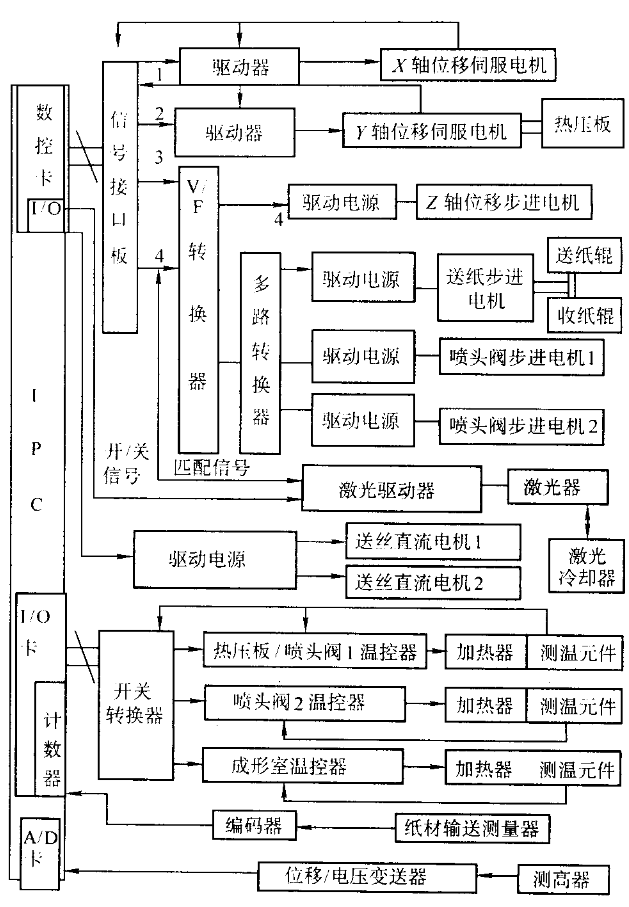
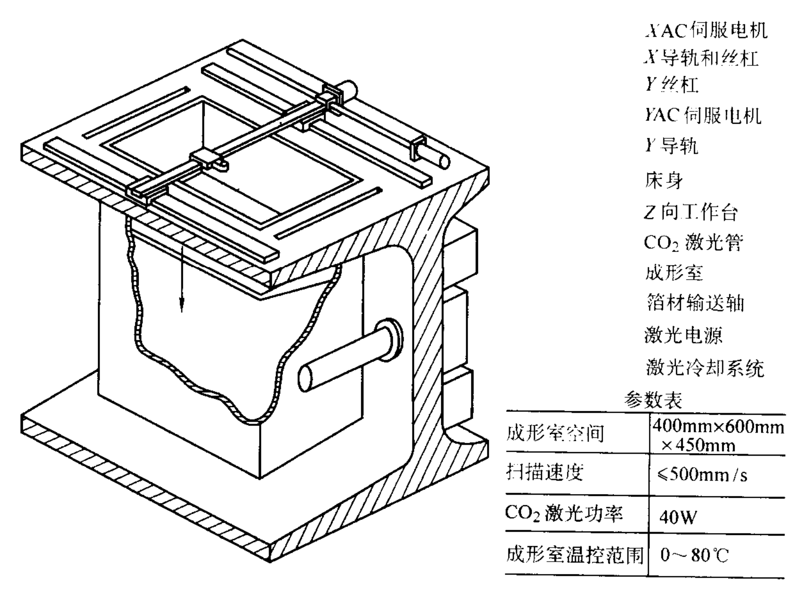


图 6.10-12 机械电子学模型控制原理图

3.3 统一结构模型

综合考虑 SSM 工艺和 MEM 工艺在机械结构的方面的共性和差异，在机械电子模型的框架内设计统一的机械基体结构（图 6.10-13、图 6.10-14 和图 6.10-15）和控制－驱动组合体结构（图 6.10-16）。机械基体结构和控制－驱动组合体结构的总和称为统一结构模型。



参数表

参数	值
成形室空间	400mm×600mm ×450mm
扫描速度	≤500mm/s
CO_2 激光功率	40W
成形室温控范围	0～80℃

图 6.10-13 机械基体结构图

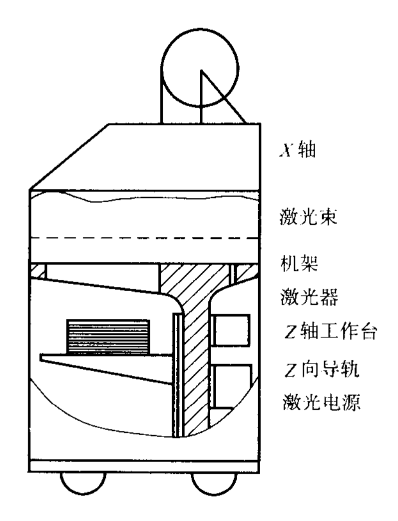


图 6.10-14　机械基体结构 SSM 状态图

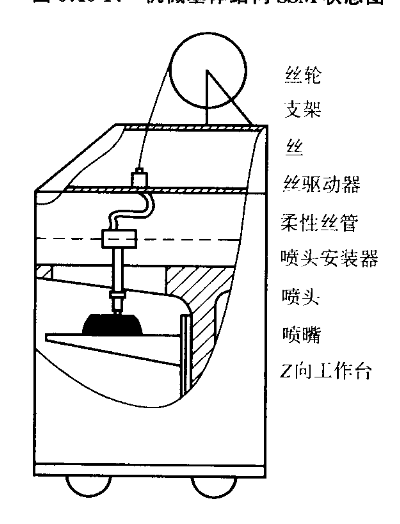


图 6.10-15　机械基体结构 MEM 状态图

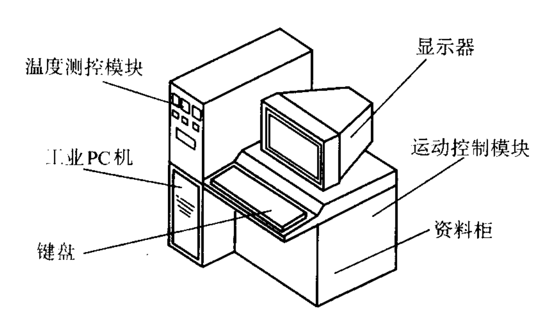


图 6.10-16　控制－驱动组合体结构图

4　集成度计算

4.1　集成度计算原理

用矩阵的方法可以描述各子功能的耦合关系，用矩阵重排的方法则可以揭示各子功能的耦合性联系。集成度定量计算矩阵，称为集成度矩阵，矩阵的行为工艺之种类，列为子功能种类，矩阵的元素为各子功能对于各工艺的可共用性的度量值，用一特定规则运算此矩阵各元素之值，则可定量计算其可集成性，获得集成度值，作为集成的依据。计算依据如下。

1）共有 n_0 种 RP 工艺，m_0 个子功能参与集成，则该“子功能－工艺矩阵”（即集成度矩阵）为 i 行 $\times j$ 列矩阵且 $i=m_0$，$j=n_0$。

2）如某一子功能仅对 n_j（$1\leqslant n_j\leqslant n_o$）种 RP 工艺存在可共用性，则相应的元素值均为 n_j，其余之元素值为 0（不需要此子功能）或 1（需要此功能，但无可共用性）。

3）每一行各元素值之和之最大值为 n_0^2（即 n_0 个 RP 工艺均需要此子功能），为使其可比化，将每一行各元素之和除以 n_0^2 即为该子功能的可共用性的量度 I_1。

$$I_1 = \sum_{j=1}^{n_0} n_j / n_0^2$$

显然，每一子功能的可共用性值最大为 1.0，如表 6.10-5 中的 A_1。最小为 $1/(n_0^2)$，如 A_4，即除 a_3 工艺外其它工艺均不需要 A_4。A_5 的可共用性略好些，但不能将 a_1 中的 A_5 功能直接用于 a_2 和 a_3，虽然 a_2 和 a_3 是需要此类子功能的。可见将 A_5 改造成可共用性好的子功能将是重要的。

4）每一列（对应于某一种工艺）各元素之和除以 n_0^2 即为该工艺的对各子功能需要的程度称为兼容性 I_2。

$$I_2 = \sum_{i=1}^{m_0} n_i / n_0^2$$

显然，表 6.10-5 中 a_3 工艺具有最大的兼容性。

5）通过 I_2 或 I_1 值除以子功能总数 m_0 均可得出该系统的集成度 I

$$I = \sum_{j=1}^{n_0} (I_2)_j / m_0 = \frac{\sum_{j=1}^{n_0} \left(\sum_{i=1}^{m_0} n_i \right)_j}{n_0^2 \times m_0} \quad 或$$

$$I = \sum_{i=1}^{m_0} (I_1)_i / m_0 = \frac{\sum_{i=1}^{m_0} \left(\sum_{j=1}^{n_0} n_j \right)_i}{n_0^2 \times m_0}$$

表 6.10-5 是说明上述方法的示例。

表 6.10-5　$m_0=5$　$n_0=3$

工艺 a_j / 功能 A_i	a_1	a_2	a_3	I_1
A_1	3	3	3	9/9
A_2	2	1	2	5/9
A_3	0	2	2	4/9
A_4	0	0	1	1/9
A_5	1	1	1	3/9
I_2	6/9	7/9	9/9	22/9

分析表 6.10-5 可以发现：

1）包含了哪些子功能的哪些工艺，集成在一起最为合理的。显然，I 值大的系统比 I 值小的系统是更为合理的集成系统，如将 a_1 删除，仅 a_2 由 a_3 和组成系统，可计算 I 值为 0.65。如删除 a_2 功能，系统由 a_1 和 a_3 组成，则同理计算可得 $I=0.6$，显然此种集成不如 a_2 和 a_3 的集成度好。

2）哪些子功能是值得去改造和创新以提高整个系统的 I 值？则 A_5 是首选的子功能，其次是 A_2，如能创造出一种新机械（或结构），被 a_1，a_2 和 a_3 均采用，则 I 值即可大幅度提高。

3）就 A_4 本身而言是无法提高其 I_1 值的，除 a_3 外，a_1 和 a_2 均不需要。只有将 A_4 与其它子功能耦合，才有希望提高其可共用性，这也是此类子子功能改造的途径。

4）只有在工艺数量相同的情况下，集成度之比较才有意义。



4.2 具有三种 RP 工艺的多功能 RPM 系统的集成度计算

下面从 SL，SSM，MEM 和 SLS 四种 RP 工艺中任选三种进行组合（共有 6 种组合），计算其三种组合的集成度以获得合理的集成方法。见表 6.10-6。

第 1 种组合即 SSM + MEM + SLS，$I = 69/(9 \times 14) = 0.5476$

表 6.10-6 $m_0 = 14$ 或 15，$n_0 = 3$

序号		(1)				(2)				(3)			
		SSM	MEM	SLS	I_1	SL	SSM	MEM	I_1	SL	MEM	SLS	I_1
1	$X-Y$ 扫描	3	3	3	9/9	3	3	3	9/9	3	3	3	9/9
2	Z 向升降测高	3	3	3	9/9	3	3	3	9/9	3	3	3	9/9
3	激光－光路	2	0	2	4/9	1	1	0	2/9	1	0	1	2/9
4	材料输送	1	1	1	3/9	0	1	1	2/9	0	1	1	2/9
5	加压	2	0	2	4/9	0	1	0	1/9	0	0	1	1/9
6	刮平	0	0	0	0	1	0	0	1/9	1	0	0	1/9
7	铺粉	0	0	1	1/9	0	0	0	0	0	0	1	1/9
8	温度测控	3	3	3	9/9	0	2	2	4/9	0	2	2	4/9
9	CAD	3	3	3	9/9	3	3	3	9/9	3	3	3	9/9
10	支承	0	1	0	1/9	1	0	1	2/9	0	1	1	2/9
11	数据检验处理	1	1	1	3/9	1	1	1	3/9	1	1	1	3/9
12	分层	3	3	3	9/9	3	3	3	9/9	3	3	3	9/9
13	控制	1	1	1	3/9	1	1	1	3/9	1	1	1	3/9
14	排烟—气氛控制	2	0	2	4/9	0	1	0	1/9	0	0	1	1/9
15	清理	0	1	0	1/9	0	0	1	1/9	0	1	0	1/9
	I_1	24/9	20/9	25/9	69/9	17	20	19	56/9	16	19	22	57/9

第 2 种组合即 SL + SSM + MEM，$I = 56/(9 \times 14) = 0.444$

第 3 种组合即 SL + MEM + SLS，$I = 57(9 \times 15) = 0.4222$

第 1、2 种组合中 m_0 为 14，而第 3 种组合中的 $m_0 = 15$。以上分析可以说明具有三种 RP 工艺的多功能系统以 SSM，MEM 和 SLS 的集成度最高，是比较合理的组合。另外 3 种组合值均小于 0.547 6。

采用统一的数据处理模型，机械电子学模型和结构模型可大大提高各子系统对各工艺的可共用性，从而提高 I 值。

如按前述统一模型设计 M－RPMS 系统，当仅有 SSM 和 MEM 功能时其集成度矩阵如表 6.10-7 所示，$I = 11.5/15 = 0.77$，集成度好。

表 6.10-7 $m_0 = 15$，$n_0 = 2$

序号		SSM	MEM	I_1
1	$X-Y$ 扫描	2	2	1
2	Z 向升降	2	2	1
3	测高	2	2	1
4	激光系统	1	0	0.25
5	温度控制	2	2	1
6	材料输送	1	1	0.5
7	统一机架结构	2	2	1
8	统一控制体	2	2	1
9	统一数据处理	2	2	1
10	统一监控	2	2	1
11	热压	1	0	0.25
12	抽烟	1	0	0.25
13	冷却送风	0	1	0.25
14	IPC	2	2	1
15	数控卡	2	2	1
	I_2	24/4	22/4	11.5

5 多功能快速成形系统 M－RPMS

多功能快速成形制造系统 M－RPMS（multifunctional rapid prototyping manufacturing systems）是一个机械电子学产品，它不同于一般的、传统的纯机械产品。其特点是：它是一个高阶系统，耦合在一起的多维参数对应（控制）多种物理功能；它是一个多回路的反馈系统，与执行体有关的各种信息，通过各反馈回路输到驱动体或控制体，完成实时信息处理和控制。它是一个非线性系统，主要表现在机械电子单元的非线性和滞后现象。许多情况下，单元的输入与输出并非简单比例关系而是复杂的非线性关系。

多功能快速成形系统 M－RPMS（见图 6.10-17）基于复合离散－堆积的概念，并在此框架内将 RP“单元技术简单集成”发展成为“单元技术复杂集成”，通过扫描路径规划统一模型，统一功能模型（机械电子学模型）和统一结构模型，在一台设备上完成多种 RP 工艺。所提出的集成度的概念和定量计算方法，从原则上解决了如何规划和设计子功能以保证“单元技术复杂集成”的实现。该系统的特点如下。

1）在一台快速成形设备上完成两种以上的快速成形工



艺，这是世界快速成形领域的首创。SSM 和 MEM 工艺的尺寸精度分别达到美国著名厂家 Helisys 公司和 Stratasys 公司的尺寸精度标准。

2）工艺规划数据处理软件系统 RP－CAPP 能支持多种快速成形工艺，可处理任意规模的 STL 文件，分层速度快，具有强大的显示、纠错、修复、分割、拼合和自动生成拼合面结构和编辑功能。RP－CAPP 除拥有一般支撑结构生成功能外，还拥有整体支撑功能，它使 MEM 成形件的变形减小到最低限度。



图 6.10-17　多功能快速成形系统 M－RPMS
（清华大学激光快速成形中心提供）

图 6.10-18 和图 6.10-19 为采用多功能快速成形系统 M－RPMS 制作的原型件。

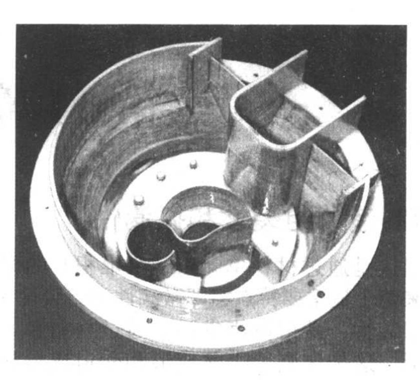


图 6.10-18　采用 M－RPMS 制作的 SSM 原型件（材料为涂敷纸）
（清华大学激光快速成形中心提供）

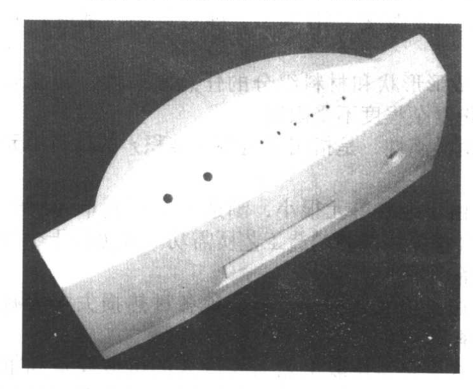


图 6.10-19　采用 M－RPMS 制作的 MEM 原型件（材料为 ABS）
（清华大学激光快速成形中心提供）

编写：卢清萍（清华大学）

第 11 章 快速制造概述

1 快速制造的组装性和微滴性

快速制造是通过材料单元组装（堆积）的原理进行成形，其带来两个最重要特点，即微滴性和组装性。

所谓组装性，是指快速成形是通过材料单元组装（堆积）而成形，这是区别于去除成形和受迫成形最基本的特点。

① 组装性是快速制造柔性的根本保证。无需改变工装或模具，只要改变 CAD 模型，即可组装（制造）另一个零件。

② 成形形状和材料组分的任意复杂性，即成形件的结构和组份复杂程度不受限制。

所谓微滴性，是指用于组装（堆积）的材料单元十分微小。

① 由于组装单元很小，制造一个微滴单元所消耗的功率极小（整体铸锻的制造工艺所需功率大出若干个数量级），因而设备功率小。

② 由于单元体积小，相应地各种热损失大大减少，能源利用率高。

③ 大型整体铸锻工艺需要巨大的机械设备和重型模具和工装，巨大的厂房和大型运输工具；而采用微滴组装概念的工艺无需大型装备，因而对各种设备和设施的投资相应地减少。

微滴性和组装性综合的最终结果导致制造全过程的快速性。从材料组装的角度上分析，显然微滴越小组装精度越高，但组装速度越慢；获得高的成形效率则应加大微滴之尺度，但零件质量的提高就越困难。组装的速度并不是制造速度的全部，仅是重要的一部分。快速制造的快速性是建立在组装性基础上的柔性，因此可以说组装性是快速制造快速性的基础；而微滴性是快速制造组装性的前提，丧失了微滴性就无从组装，同时失去了柔性。所谓快速制造就是根据微滴组装的原理，充分发挥微滴性与组装性之优势，组装金属、陶瓷和生物活性材料甚至细胞和生物大分子等，形成具有特定机械功能、特种物理化学性能的功能零件之先进制造技术。

2 快速制造的内涵

由数字直接驱动的成形制造是本世纪制造科学发展的重要趋势，也是当今工业界研究与开发的热点。从学科交叉角度分析，快速制造是制造科学、信息科学和材料科学交叉融合的边缘学科。

快速制造的内涵主要体现为：制造过程中信息过程与物理过程相统一、材料制备与材料成形相统一、结构梯度与材料梯度相统一。

2.1 制造过程中信息过程与物理过程相统一

任何制造过程均由制造的信息过程与制造的物理过程（有时包括化学过程）组成。对传统的制造技术——去除成形和受迫成形来说，这两个基本过程是分离的，而快速制造则将它们初步统一起来。

去除成形和受迫成形的信息过程基本上要预先完成，成形过程仅作适当地实时修改；信息过程的作用主要体现在对刀具（模具）和成形条件及环境的直接控制，对材料的作用则是间接的。快速制造的信息过程与物理过程是相统一的，主要表现在信息过程对材料的单元化处理以及将材料单元的组装作用和控制，信息过程对材料的直接作用是制造科学进步和实质性变化的重大表现。

从制造的信息过程来看，RM 可视为一种将源于产品数字模型的层面数据（layered data）转换为物理结构的通道——数据通道（data channel —— DC）[1]。

上述概念可以抽象化为图 6.11-1 的结构，双虚线所示的垂直管道就是数据通道。

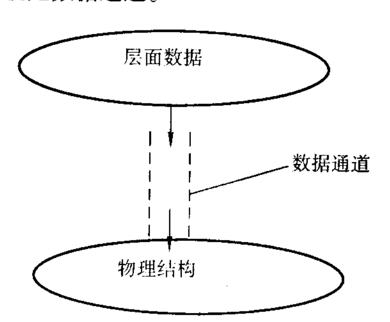


图 6.11-1 一维数据通道图

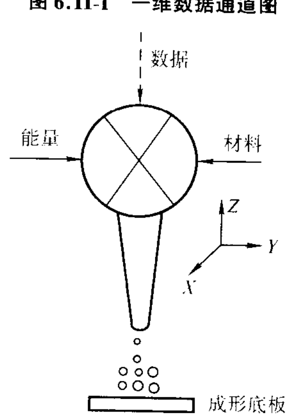


图 6.11-2 数据通道物理模型

其功能为根据输入的信息（数据）驱动材料离散成微滴，并输送微滴组装（连接）到与产品数据模型相对应的位置上，如此重复连接而形成与 CAD 模型一致的物理结构。数据通道将无形的数据转换成物化了的数据（形状、结构、精度等等），将表现为数据的信息转换为表现为形态（形状、结构和表面质量）的信息。图 6.11-1 所示的数据通道可用更形象的物理模型来说明，见图 6.11-2。任何一个数据通道都对应了一个物理模型，输入转换器的材料在能量的作用下，可形成微滴或微流，但只有在数据的激励下才通过喷嘴喷（或挤）出，所谓数据还包括激励（控制）转换器作 $X-Y-Z$ 三轴联动的数据。这样对零件 CAD 模型处理所获得的数据就转换成成形底板的三维物理模型。传统的材料加工方法中，数据仅驱动刀具，刀具加工材料而成形，或用此种驱动关系完成模具制造，材料在模具型腔的约束下成形，数据并不直接驱动材料去建立物理模型，因而不存在数据通道。采用数据通道完成成形制造是制造科学先进的制造理念，也

[1] D.T.Pham 和 S.S.Dimov，在香港大学 ICMA2002 国际会议上的专题发言。



是信息科学促进科学发展的良好形式。数据通道可分为一维和二维的结构，一维又可细分为单一维，双一维和线一维三种如图 6.11-3 所示。

构建一个层面，单一维和双一维 DC 均需作 $X-Y-Z$ 三维联动，而线一维 DC 只需进行 $X-Z$ 或 $Y-Z$ 的二维联动，另一维运动则通过数据通道 DC 的导通来实现。对一维数据通道，不论它运动的轨迹是多么复杂，需要多少维运动控制才能确定其运动姿态和位置，而数据通道的激发仅需一维数据。为了提高成形效率，可采用二维 DC，它由若干个通道组成一个矩阵，每次堆积成形须用二维的数据才能确定所有激发态和休眠态的数据通道。

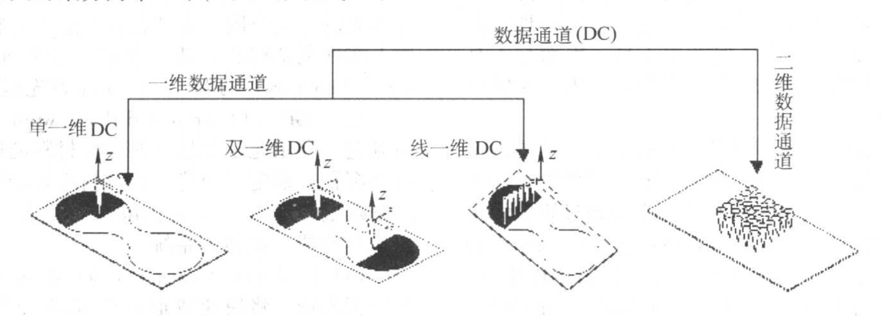


图 6.11-3　数据通道的形式

RM 的物理本质要联系数字通道中所发生的两个非常关键的物理过程来分析。这两个物理过程都是在数据的直接驱动下进行的，即材料微滴单元的形成（获取）与材料微滴单元的组装。材料微滴单元是一个广义的概念，从尺度上看，可以是 1 ~ 10 mm 或 100 ~ 500 μm 的材料微滴，10 ~ 100 μm更小的材料微滴，0.1 ~ 10 μm 有生命的细胞，10 ~ 100 μm 的大分子等。材料微滴单元的从材料种类看，应包括金属、陶瓷和高分子材料；细胞等生命单元；还应包括大分子等。材料微滴单元尺度的微细化是 RM 进步的前提，也是技术进步的标志。这种离散并不是常规意义上的制粉，而是与数据相对应的有序的材料微滴。

材料微滴单元的获取是通过数字通道中的使能系统和材料系统来完成的。使能系统当前主要分为两类：数字微滴流和高能束流系统，前者将熔（溶）的材料通过由电、磁、气、液等作用从喷嘴中，按数据规定的要求喷出形成与数据脉冲相对应的微滴；后者则采用能量密度高易于精确控制（聚焦）的高能束流转化（固化、胶联、气化分离、熔化、烧结）材料形成微滴；近代，用特殊波长之激光束捕获悬浮于气体或液体中的微滴或细胞也是一种形成微滴的使能技术。

材料微滴单元组装的核心，在于微滴单元位置的精确定位和单元之间的连接。这种组装工作，在数字通道中，是通过数据直接驱动的运动系统来完成的。通过数据通道所形成的物理结构的精度既取决于材料微滴单元之尺度又与单元的位置精度有关；而物理结构的性能则与单元材料的性质和单元之间的连接强度有关。

由上述分析可以清楚地看到，RM 的物理本质就是材料微滴单元的获取与组装，或简称“微滴组装”。微滴组装的高级形态就是分子组装，即美国制造业挑战展望委员会主席 John G. Bollinger 所谓的 21 世纪制造业的主流制造技术，RP 向 RM 方向发展正是制造技术最终朝分子组装方向发展的过程之一。

从使能系统中输出之物理量作用于材料系统产出一个个材料微滴单元；实时输送这些单元到预先规划好的精确的位置；新单元与原有已组装好的单元连接，都是在数据处理系统的规划与控制下有序地完成。这个过程既包括了数据处理过程和微滴获取与装配过程的匹配；又包括了以数据处理为主的信息的主控作用，这种主控作用不仅及于机械运动更作用于材料，并最终形成三维的物理构件，这就是数据通道的实际含义。

快速制造通过数据通道将制造过程中的信息过程与物理过程统一起来。

2.2　制造过程中材料制备与材料成形相统一

去除成形是对通过受迫成形获得的坯料进行加工而成形，显然它与材料制备过程是不同的过程。在受迫成形范畴内，材料制备过程基本上是先于材料成形过程。例如，利用材料可塑性的锻造（受迫成形）是在材料制备过程结束后才进行成形过程。

快速制造中将各种材料离散成各种材料单元，然后在 CAD 模型和材料模型的控制下，有序地堆积组装各种材料单元而形成任意复杂的三维实体，在实体的空间上，任意一个微小单元既体现了零件的拓扑属性，又体现了零件的材料属性，即体现了材料成形和材料制备的统一性。零件的材料属性取决于各材料单元的材料性质；其拓扑属性则取决于各种材料单元的取向、定位、连接方式与定位精度等。

2.3　制造过程中结构梯度与材料梯度相统一

由于制造工艺的限制，传统设计往往只能更多注重结构和结构的优化，而快速制造为了获得优越的性能，可以在考虑结构优化的同时更自由地考虑材料的优化，实现零件比较复杂的结构梯度和材料梯度。例如图 6.11-4 所示的直接激光制造 DLF（directed laser fabrication）技术中供粉箱有 4 个，通过控制供粉箱的开启及流量大小可以制造出具有材料梯度的零件；同时通过控制加工参数（如工作台的运动轨迹、速度、激光器功率），从而保证零件的结构梯度。

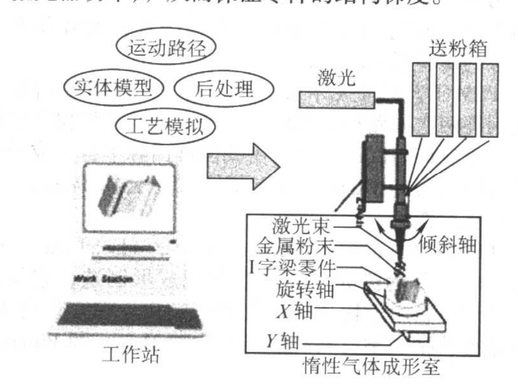


图 6.11-4　直接激光制造技术 DLF

3　快速制造的绿色制造本质

可以从各个方面来定义“绿色制造”，如低能耗、少排

放、易回收等等，从 RM 的定义就可以清楚地看出，RM 的本质就是绿色制造。它采用堆积（组装）微滴的方式成形，因而成形过程中裕（余）料的排放最低，这是任何一种成形制造法所不具备的。RM 不采用任何专用工具，因而与工具设计、生产、运输和储存造成的能源、材料、人力、时间的消耗降到最低，甚至为零。

制备微滴并组装微滴成形与材料整体成形如传统的锻造和铸造相比，消耗的能量和所需的重型装备、建设投资等相比都是微不足到的。一个 19 kW 的 CO_2 激光器通过熔覆堆积成形就可制造出功率达数千 kW 的数万吨模锻水压机生产的重型模锻件，这种大型模锻件一般都是小批甚至单件生产，这正是 RM 的优势。采用某种工艺生产零件所需功率的大小，是判断其“绿色”特性的重要指标之一。

4 快速制造发展现状

4.1 主要的快速制造技术

目前已出现的快速制造技术主要有以下几种。

1）LENS（laser engineered net shaping）称为激光近成形制造，该工艺采用激光熔敷的方法层层堆积金属成形，它由美国 Sandia 国家实验室的 David Keicher 发明，并由 Optomec Design 公司于 1997 年开始商业化运行。

2）DLF（directed light fabrication）称为直接光制造，与 LENS 技术类似，由美国 Las Alamos 国家实验室开发。

3）LAM（laser additive manufacturing）称为激光添加制造，采用激光去熔化金属粉末层层堆积成形，采用的激光器为 19 kW 的大功率 CO_2 激光器，成形室的尺寸为 3 m × 3 m × 1.2 m，可以进行大型零件的毛坯制造，由美国 AeroMet 公司开发。

4）DMD（direct metal deposition）称为直接金属沉积制造，与 LENS 技术类似，具有一套基于视觉的双反馈控制系统能对熔池进行闭环控制，由美国密西根州 POM（Precision Optical Manufacturing）公司开发。

5）DMLS（direct metal laser sintering）称为直接金属激光烧结制造，采用不同熔点的几种金属粉末，通过 SLS 工艺制作金属零部件，它由德国 EOS 公司开发。

6）SLM（selective laser melting）称为激光选区熔化制造，采用单一成分的金属粉末，其主要特点是金属粉末在激光辐照下，达到完全熔化，而非局部熔结，它由德国 F&S/MCP 公司首先开发利用。

7）EBM（electron beam melting）称为电子束熔化快速制造，利用电子束选区熔化金属粉末成形，它由瑞典 Arcam 公司申请专利并进行商业化运行。清华大学于 2004 年开发了一个类似的实验系统。

8）PCM 工艺称为无木模铸造，它采用逐点喷射粘接剂和催化剂即两次同路径扫描的方法来实现铸造用树脂砂粒间的粘接，完成铸型制造。当前由我国佛山峰华自动成形设备有限公司以及美国 Extrude Hone 集团的子公司 Prometal 公司进行产业化运作。

9）LCVD-RP（rapid prototyping of laser-induced chemical vapor deposition）称为激光气相化学沉积成形制造，它是最早将气态成形材料用于快速成形技术来制作原型零件的工艺，由美国康涅狄格大学材料科学研究所的 Marcus 和 Birmingham 提出。

10）LCLD-RP（rapid prototyping of laser-induced chemical liquid deposition）称为激光液相化学沉积成形制造，利用激光束使液态的成形材料发生光电化学反应、热电化学反应、光分解反应、热分解反应等，沉积出金属，并逐层得到三维实体零件。

11）MAPLE DW（matrix-assisted pulsed laser evaporation direct writing）称为基材辅助脉冲激光蒸发直写制造，利用脉冲激光的光压将附着在“色带”上的材料质点“打印”到基底上实现微结构的制造，由美国海军研究实验室（naval research laboratory）的 D. B. Chrisey 首先提出。

12）LGDW（laser-guided direct writing）称为激光引导直写制造，利用光压对悬浮的微粒材料的操纵能力（捕获、输运和沉积）装配（制造）具有精细复杂结构的实体，它由美国密歇根理工大学的 M.J.Renn 等人首先提出。清华大学于 2003 年完成了类似的系统。

13）LDM（low-temperature deposition manufacturing）称为低温沉积制造，将快速成形的离散-堆积原理与热致相分离法相结合，能够实现支架分级结构孔隙的成形，由清华大学研制成功。

此外，一些快速成形技术，如 SL，FDM 等，经过工艺和材料等方面的改进和提高，也已经能制备出具有使用功能的零件，它们具备了快速制造特性。

4.2 快速制造的主要工艺方法

快速制造的主要工艺方法，可分为直接快速制造与间接快速制造两大类，其中，直接快速制造指的是通过快速制造直接完成功能零件或具有完全功能的结构件；间接快速制造是指通过 RM 完成工、模具制造再采用工模具进行零件的制造。

各种快速制造主要工艺方法在生产中均已获得了不同程度的应用，下面重点加以介绍。

1）光固化快速制造工艺　美国 Align Technology 公司通过 SL 技术采用透明医用高分子材料制作隐形牙齿矫正器（一种间接快速制造）已经达到商业化的应用，截至于 2002 年底，已经生产了 100 万个以上的矫正器用于 9 万多名患者。这是一种根据病人的个体情况进行个性化设计、基于 RM 技术进行批量定制的制造技术。

SL 技术快速制造具有功能的零件主要通过以下两条途径：第一是改进光固化树脂的性能，在保留其高精度的同时，大大提高其强度和韧性；第二是采用固体激光器提高其功率，从而增加固化扫描速度大大提高生产率。国内外开发了采用 UV 固体激光器的 SLA 类型设备，功率大于 1 000 mW，扫描速度达 10 ~ 7 m/s。我国许多公司的光固化新设备均达到此项技术指标。

2）熔融挤压快速制造工艺　熔融挤压堆积成形技术不需使用激光束，设备价格较低，因此，改进熔融挤压的材料和成形工艺，提高成形件的强度和精度，使之达到直接制造功能零件的目的，工业应用前景十分诱人。国内在开发 MEM 熔融挤压快速制造系列设备的基础上，在成形材料方面的攻关取得了重要进展，完成了新型精密喷头、新型支撑软件的开发，成形件的强度和精度大大提高，成形的零件不但可以进行装配，而且可以进行功能实验。

使用高强度的聚碳酸酯（PC）丝材，并采用高温喷头，可以制造出高强度、高性能的功能零件。例如，美国一家公司采用 Stratasys 公司的 FDM Titan 设备和 PC 线材制造的皮带滑轮代替生产线上破损的铝制皮带滑轮，皮带滑轮能正常运行。我国北京殷华公司已完成 ABS 和 PC 丝材的开发和生产，正在大力推广采用 MEM - 350 等设备的快速制造。

3）激光选区烧结快速制造工艺　激光选区烧结高分子聚合物和金属粉末都可以得到功能零件。美国波音公司位于加州的 Rocketdyne 公司采用 3D Systems 的 SLS 工艺烧结玻璃颗粒增强尼龙粉末为国际航天站和航天飞机生产了几百个零件，它同时还为 F - 18 战斗机生产了许多零件。

3D Systems 公司 2003 年刚推出的金属粉末 LaserForm A6



不仅具有较高的强度、成型和表面精度，而且还具有较高的成形效率及优良的加工性能。EOS Gmbh 公司主要金属粉末材料 DirectSteel 20 - V1 的最小层厚已经降低到 20 μm 以下，致密度则达 98%。激光选区烧结是快速制造功能零件最有前途的技术之一。

4）激光熔覆快速制造工艺　激光熔覆快速制造是一种采用激光熔覆的方法将金属粉末进行逐层堆积，最终形成具有一定形状的三维实体的技术，在宇航、航空、造船和国防等领域具有极大的应用前景，它将引起重型锻、铸业，特别是特殊性能（如高温、高强度等）材料坯件成形的新一轮变革。由于激光熔覆快速制造技术成型的金属零件内部组织细化，性能高，能实现材料梯度和结构梯度功能，因而在最近几年已成为研究的热门领域之一。

美国军方正在建立的“移动零件医院”将 LENS 技术应用于战场环境下武器装备的快速修复，它能帮助军方减少备用零件总量、降低后勤成本和增加移动的灵活性。

5）金属粉末电子束熔覆/烧结快速制造工艺　金属粉末电子束熔覆/烧结快速制造技术与 SLS 技术类似，主要区别是高能束由激光束换成了电子束，成形过程在真空室环境内进行。该技术近年发展很快，已经在汽车、航空航天、医用及模具等行业得到了广泛的应用，能制造各种金属材料零部件，对易氧化的铝合金、钛合金等材料则更加具有重要应用的前景。

6）铸型的微滴喷射快速制造工艺　快速铸造砂型制造采用微滴喷射技术，在铸型 CAD 模型直接驱动下喷射树脂或其它黏结剂，黏结型砂、陶瓷粉末等耐火材料而完成铸型制造的技术，详见第 16 章。目前，主要有：无木模铸造 PCM、直接壳型铸型 DSPC（direct shell production casting）、GS（generis'RP systems）工艺、Z cast direct metal casting 工艺等。

7）激光选区烧结覆膜砂快速铸造砂型制造工艺　激光选区烧结树脂覆膜的锆砂和石英砂等，可以通过直接快速制造完成铸造用砂型。覆膜砂通过激光烧结成形后，一般并不需要为增加强度、减少树脂含量的再烧结步骤，通过 SLS 工艺所获得的“绿件”壳型可以直接用来浇铸。

8）激光选区烧结覆膜陶瓷粉快速制造工艺　陶瓷壳型覆膜陶瓷粉的粒度比覆膜砂小，一般是粉末或粉粒，有时也用细微粉末或微粉末。烧结在高温工作室内进行以降低壳型的翘曲。直接制造出的陶瓷壳型具有很高的强度，可以直接作为壳型进行浇铸。

9）快速工模具（rapid tooling，RT）　直接和间接快速工模具制造也是一大类快速制造工艺。直接快速模具是利用不同类型的 RM 技术直接制造出模具本身，然后利用一些必要的后处理和机加工以获得模具所要求的力学性能、尺寸精度和表面粗糙度。直接快速模具技术具有制造环节简单，能够充分地发挥 RM 技术的优势，对于那些需要复杂形状的内流道冷却的模具与零件，采用直接快速模具技术有着其它方法不可替代的独特优势。但它在模具精度和性能控制方面有待改进，特殊的后处理设备与工艺使之成本提高，模具的尺寸也受到较大的限制。

间接快速模具制造是快速制造中的重要方面。RP 技术与传统的制造工艺相结合，可以产生层出不穷的间接快速模具制造技术，这也是 RM 的发展方向之一。

组装（堆积）金属（黑色金属、有色金属以及其它耐高温合金等）成形的难度决定了直接快速模具在未来的若干年内无法在快速模具领域中占据统治地位。这一期间内，主要还是间接快速模具技术，即需要进行快速原型转换而制造模具的技术占统治地位。但是，随着大功率激光烧结、激光同轴送粉、三维焊接（3D welding）、均匀微滴喷射（UPS）以及其它激光净成形技术的完善，估计直接快速模具将逐渐成为快速模具技术的主流。直接快速模具被许多专业人士重视还有如下三个原因：模具公司都希望取消制造模具原型（pattern）以及原型后处理的过程，以提高快速性；通过原型转换将损失精度，使精度的补偿控制复杂化；间接快速模具生产的模具寿命往往较低，这也是它在竞争中处于不利地位的一个原因。

直接快速模具与间接快速模具的竞争是快速模具发展的内部驱动力。在其推动下，将会涌现出更多的快速模具技术与装备。快速模具的外部竞争主要是高速数控铣削 HSM（high speeds mill machine）模具加工技术。事实上，HSM 和快速模具都是得到 CNC 技术支持的技术范畴。但前者是数字化的模拟加工，即数字化技术只支持到对工具的控制阶段，而被加工的材料与数字化技术无关，因而它不可能完成更复杂的形状（如具有内流道的模具），也不可能制造具有功能梯度、材料梯度的模具，只能是单一材料的切削加工。快速模具是基于离散 - 堆积成形原理的技术，数字化技术不但支持工具轨迹运动等的控制，而且直接及于材料本身，数字化技术将控制材料微滴的材料种类、形成、形态、运动轨迹，以及微滴间的相互联结，因而这是真正意义上的数字化制造。这一本质的区别决定了快速模具的长期生命力和根本竞争优势。它可以完成复杂内流道的直接制造，可以制造具有材料梯度和功能梯度的更为优良的工具和模具，但也正是离散 - 堆积的原理，限制了快速模具技术当前的精度和表面光洁度，使其与 HSM 的竞争中处于一定程度的不利地位。不可否认，快速模具必然是要在与 HSM 竞争中求得发展空间的，但反过来也是一样，HSM 也会在与快速模具竞争中更好地发展。

5　金属零件和模具快速制造主要研发和生产单位

目前，全世界已经有 12 家公司推出能进行金属零件和模具快速制造的商品化机器，这些公司主要分布在美国、少数在欧洲，以 SLS、LENS、3DP 技术为主，他们是快速制造的先锋。

3D Systems 公司在金属零件和模具的快速制造方面以原 DTM 公司的 SLS 技术及设备为主，并推出了新的成形机器 Vanguard。

Extrude Hone 公司在金属零件和模具快速制造方面有两种机器，第一种是收购了原 Generis 公司后推出的 ProMetal S15 机器，第二种是基于 3DP 技术的 R10。前者能成形较大的砂型及铸件，后者能直接成形金属零件。

Z Corp 公司将 3DP 技术与铸造技术相结合，推出了 Z Cast Metal Casting 技术，其设备主要有 ZPrinter 310、Z406 和 Z810。

Optomec 公司是 LENS 技术的拥有者，该公司的主要设备型号有 LENS 750、LENS 850 和 LENS 850R。

POM 公司的技术为 DMD，设备主要有 DMD 505（2D）和 DMD 505（3D）。

Aeromet 公司的技术名称为 LAM，主要以金属零件修补及毛坯制造为主。Prometal 是 Aeromet 的子公司，主要从事大型和中小型铸造砂型制造。

EOS 公司的直接制造铸造用砂型的设备名称为 EOSINT S700，直接制造金属零件和模具的设备型号有 EOSINT M250 Xtended 和 EOSINT M270。

Phenix Systems 公司位于法国，以 LS 技术为主，设备名称为 PM100 和 PM250。

Arcam 公司位于瑞典，以 EBM 技术为主，设备名称为 EBM S12。

Concept Laser（德国 M3）位于德国，一台设备具有三种



功能：激光烧结、激光打标、三维雕刻。设备名称为 M3 Linear。

F&S/MCP 公司位于德国，以 SLM 技术为主，设备名称为 FS - Realizer SLM。

佛山峰华自动成形装备有限公司由北京殷华公司和广东佛山水泵厂共同投资设立，以 PCM 技术为主。主要设备为 PLCM-1500。

6 快速制造的应用

影响快速制造是否被生产实践所采用的因素主要有两个（如图 6.11-5 所示）：形状与结构的复杂程度和批量大小。当批量很小时，无论形状复杂程度如何均值得采用 RM；当批量大时，仅形状和结构复杂的零件才采用 RM。

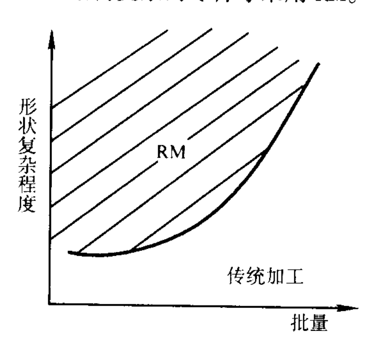


图 6.11-5 快速制造与传统加工的应用范围

英国 Loughborough 大学设立了欧洲最大的快速制造中心，该校 P. M. Dickens 教授指出，在成本上，传统工艺制作注塑模与快速制造技术制造注塑模有一个交叉点。对于 SLS 工艺，当成形件的批量低于 14 000 件时，采用 SLS 工艺快速制造的模具成本低于传统工艺；这个批量对于 FDM 工艺是 6 500件，对于 SL 工艺是 5 000 件。批量低于上述件数，快速制造模具具有成本上的优势；反之，传统注塑模制造工艺比较合适。当然，上述数据随着各 RM 工艺的发展还会有所变化。快速制造工艺选择可参考图 6.11-6 确定。

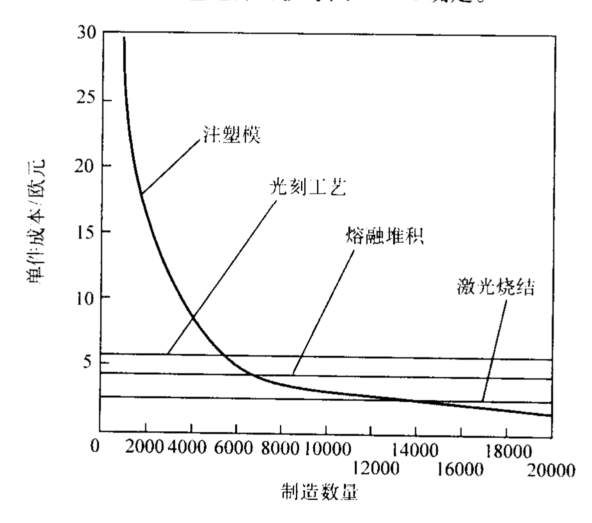


图 6.11-6 快速制造工艺选择原则

近年来国内外在快速制造领域呈现出快速发展的势头，在材料、工艺、设备和成形件的精度、强度等方面都得到了长足的进步，正在形成一种新的具有巨大潜能和市场价值的制造工艺方法。

编写：颜永年（清华大学）
齐海波（清华大学）



第 12 章　激光快速制造技术

激光快速制造技术是以激光为使能技术，利用 CAD 数字模型驱动高能量密度的激光束熔化、烧结、连接金属粉末或板材直接成形金属零件或模具的一项快速制造技术。

主要的激光快速制造技术有：激光熔覆快速制造、激光选区烧结快速制造、激光选区熔化快速制造、激光金属板材叠加快速制造和生坯带激光烧结快速制造。其中，激光熔覆快速制造和激光选区烧结快速制造技术更是立足于金属零件/模具的快速制造，在现代航空航天、国防、汽车等工业领域蓬勃发展，已经成为了一种主要的快速制造技术。

1　激光熔覆快速制造技术

激光熔覆快速制造技术，又称激光近形制造技术 LENS（laser engineered net shaping），是在激光熔覆技术和快速原型技术的基础上发展起来的一种金属零件直接快速制造新技术，其发明人是美国 Sandia 国家实验室的 David Keicher。1997 年，David Keicher 加入到 Optomec Design 公司，开始了 LENS 技术的商业化运作。此后，DMD、LAF、DLF、SDM 等类似技术相继出现，带动了激光熔覆快速制造技术的蓬勃发展。1999 年，LENS™ 获得了美国工业界“最富创造力的 25 项技术”之一的称号。

1.1　概述

1.1.1　定义

激光熔覆（laser cladding）又称激光包覆、激光涂覆。激光熔覆是利用一定功率密度的激光束照射被覆金属表层上的具有某种特殊性能的材料，使之完全熔化，而基体金属微熔，冷凝后在基材表面形成一个低稀释度的包覆层，从而达到使基材改性的目的。激光熔覆的熔化主要发生在外加材料中，基材表面微熔的目的是使之与涂覆合金达到冶金结合，以增强涂覆层与基材的结合力，并防止基材元素与涂覆层元素的互扩散而改变涂覆层的成分和性能。

激光熔覆快速制造技术是激光熔覆技术与快速原型技术相结合的产物。首先，由 CAD 产生零件模型，并用分层切片软件对其进行处理，获得各截面形状的信息参数，作为工作台进行移动的轨迹参数。然后，工作台在计算机的控制下，根据几何形体各层截面的坐标数据进行移动的同时，用激光熔覆的方法将粉末进行逐层堆积，最终形成具有一定形状的三维实体零件。

1.1.2　技术路线

激光熔覆是一种已进入工业应用阶段的表面改性技术，其主要技术路线包括基材的表面预处理、送粉熔覆及后处理。其中，主要的送粉方式有两种：一种是预置涂层法，就是用电镀、真空蒸镀、热喷涂、化学粘接等方法将要熔覆的合金预先涂覆在基材表面，然后采用激光进行重熔处理；另一种方法是同步送粉法，在激光照射过程的同时将粉末用送粉器送入熔池内熔化、凝固。相对于预置涂层法，同步送粉法由于其操作的灵活性和在熔覆过程可以随时随地的改变熔覆合金的成分而得到了广泛应用。

同步送粉法工作时，粉末由送粉器经送粉管直接送入工件表面激光辐照区，粉末到达熔区前先经过光束，被加热到红热状态，落入熔区后随即熔化，并随工作台的移动和粉末的连续送入形成激光熔覆带。

同步送粉法又分侧向送粉法和同轴送粉法。由于设计简单，侧向送粉在激光熔覆快速制造技术的开始阶段被广泛采用。但是，侧向送粉用于激光熔覆快速制造时存在许多缺点：首先，送粉位置与激光中心很难对准，这将导致粉末利用率下降；其次，零件的尺寸精度很难保证，例如零件的垂直度；另外，侧向送粉只适合于一些厚壁零件，而不能制造薄壁件，这是由于侧向送粉喷嘴喷出的粉末是发散的，而不是汇聚的。同轴送粉如果具有闭环粉末流率反馈系统，则可以提供更加稳定、连续和精确的粉末流率，能将粉末精确地传送到熔池中形成高质量熔覆轨迹，而且粉末的进给和激光束是同轴的，故能很好地适应扫描方向的变化，确保制造零件的精度。同轴送粉装置中粉末喷出后呈汇聚状，因此可以制造一些薄壁件（1 mm）。

图 6.12-1 为侧向和同轴送粉法熔覆过程示意图。

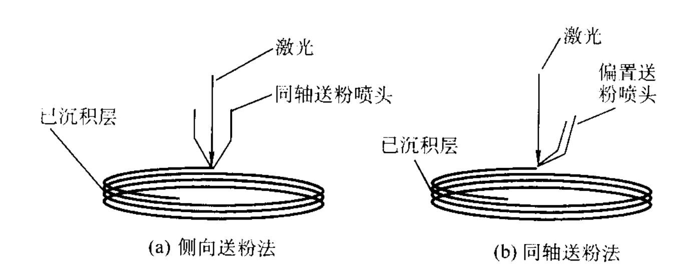


图 6.12-1　同轴送粉法示意图

1.1.3　特点

激光熔覆快速制造技术与其他传统制造方法相比，其突出优点如下。

1）高柔性　在计算机的控制下可以方便迅速地制作出传统加工方法难以实现的复杂形状的零件，例如具有复杂凸凹部分及中空的零件。通过改变 CAD 模型文件可使设计工程师方便、经济地对零件进行修改补充，还可以在加工零件时实时改变材料或改变材料的送粉配比，以便灵活改变零件不同部位的成分，使零件具有优异的综合性能。

2）技术集成性　它是计算机技术、数控技术、激光技术与材料技术的综合集成。

3）生产周期短，效率高　由于该技术建立在高度技术集成的基础之上，从 CAD 设计到零件的加工完成只需几小时到几十小时，这一特点使其特别适合于新产品的开发。Abbott 等人在一个 3 m × 3 m × 1.2 m 的加工间和一种新型的能够提供高质量粉末流率送粉器的系统中，利用 LENS 技术制造钛合金零件，其制造时间比传统技术缩短了 50% 到 75%。该加工间能加工在氩气气氛保护下的大尺寸零件，氧压低于 10×10^{-6}，这对极易与氧和氮反应的钛合金是极其关键的。

4）不需要制作昂贵的工模具，生产成本低。

5）应用范围广阔　激光熔覆制造技术不仅可用于零件的直接制造，而且还可用来修复大的金属零件。

6）成形精确，减少了后处理工序　使用聚焦激光辐照时，形成的熔池很小，可制出外形精密的零件。因烧结点的大小和激光束的有效直径差不多，故零部件的壁厚可以精确调节，这样就减少了后处理工序。

7）可成型材料广泛　只要被加工材料对所用激光器的激光波长有低的反射率，这种材料就可用 LENS 方法来处理。既可以用来制作普通合金零件如 316L、410L 不锈钢及 P20 工具钢零件，又可用来加工钛等易氧化金属零件，还可

加工 $MoSi_2$、TiAl、NiAl 等金属间化合物的难熔零件，改变了人们对材料的选择原则。

8）材料的利用率极高，多余的粉末可以重复利用。

目前激光熔覆快速制造技术仍存在尺寸精度不高、表面粗糙、层间结合力不强、需使用大功率激光器，设备造价昂贵、成形时热应力大等需要加以改进的问题。

1.2 激光熔覆快速制造技术的硬件

激光熔覆快速制造系统主要由计算机、高功率激光器、高精度数控工作台、送粉系统和熔池温度控制和反馈系统组成，图 6.12-2 为其组成系统示意图。

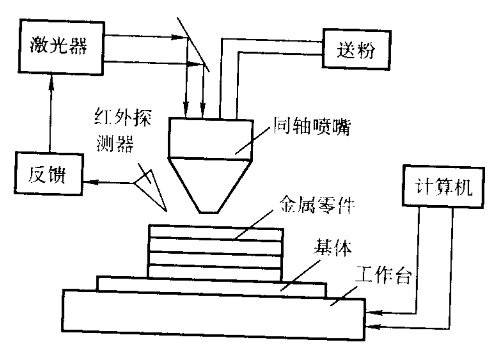


图 6.12-2 激光熔覆快速制造系统示意图

激光熔覆快速制造系统中计算机用于建立待制作零件的三维 CAD 模型，将零件的 CAD 模型转换成 STL 文件，利用分层切片软件对零件的 CAD 模型进行切片处理，生成一系列具有一定厚度的薄层，并形成每一薄层的扫描轨迹来控制工作台的运动。激光熔覆快速制造系统通常使用高功率的 CO_2 激光器，功率为几千瓦到几十千瓦，激光器输出功率的稳定性对制造零件的尺寸精度有重要的影响。高精度数控工作台是激光熔覆快速制造金属零件的关键，直接影响着所制作零件的精度和零件的复杂程度。要求工作台运动平稳、精度高，多轴联动。

与其他快速原型及快速制造技术不同的是，激光熔覆快速制造系统需要特殊的送粉系统、温度控制和反馈系统。

1.2.1 送粉系统

送粉系统是激光熔覆快速制造系统中一个非常重要的组成部分。送粉系统性能的好坏决定着成形零件的最终质量。要求送粉系统能够提供均匀稳定的粉末流。在激光熔覆中所用的侧向送粉系统无法满足熔覆层的尺寸和性能在各个方向保持一致的要求，一般的送粉器也难以达到送粉量低速均匀性等要求，因此，高质量的送粉系统对成形零件质量的好坏起着重要的影响。

完整的送粉系统包括喷头、送粉器、气体压缩机。气体压缩机的气体携带送粉器的粉末通过输送软管进入喷头，气压可以调节从而调节送粉流量。送粉系统应和数控系统形成闭环控制，这样就能灵活控制送粉。另外，压缩气体也可以直接导入喷头作吹除粉尘、流通冷却和保护气体用。喷头内部应该包括粉末通道、气体通道、激光通道和冷却液通道。

各国在发展激光熔覆快速制造技术时均首先研制各自高质量的同轴送粉熔覆系统并往往以专利形式加以保护。

（1）喷头的应用背景

粉末成形的材料输送有两种方式，一种是铺粉式，一种是喷头送粉式。前者的优点是不用添加支撑，可以比较容易地实现均匀的铺粉，缺点是只能用一种材料，粉末量不能灵活控制；后者优点是送粉量随时可以灵活控制以适应相应的激光功率和扫描速度，可以改变粉末的成分配比，可以用多喷头送不同材料，从而成形特殊的复杂零件，缺点是需要加支撑，送粉的均匀性控制比较困难，对喷头要求高。喷头送粉可以根据喷头的位置分为同轴式和偏置式。同轴式喷头与激光同轴，送粉无方向性；偏置式则是喷头偏置于激光一侧，有方向性。

喷头在成形系统中的位置如图 6.12-3 所示。A 所示为成形系统，H 所示为成形空间。激光束从喷头的轴心穿过射到工作台上，粉末也汇聚到轴心送下来。喷头沿 Z 向上下运动。

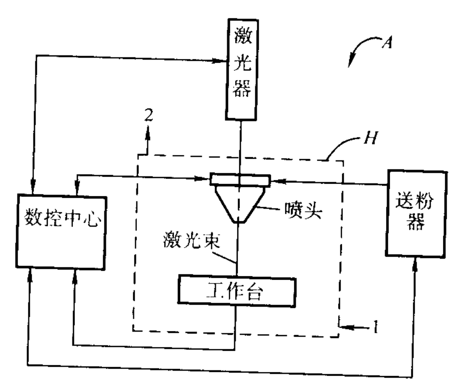


图 6.12-3 同轴送粉成形系统示意图

（2）几种喷头的分析

激光熔覆快速制造技术是近几年得到重视和发展的新的快速制造技术，目前世界上有相当多的研究机构在这方面开展了研究工作，因此也发明了几种专用的喷头。下面列出几种典型的专利进行分析，其中第一种是早期激光熔覆用喷头，对于直接金属沉积工艺的喷头有很重要的参考价值。

1）早期激光熔覆用喷头　激光熔覆快速制造技术类似于激光熔覆在三维空间的叠加。激光熔覆、激光表面合金化是出现得比较早的激光表面处理技术，相应地产生了用于这些工艺的粉末喷头。如图 6.12-4 所示为一种同轴式激光熔覆喷头。2 为粉末输送管，由气流携带粉末。金属圆盘 5 上有一圈小孔 9 可用于分布粉末使之相对均匀的进入腔 4 和 8

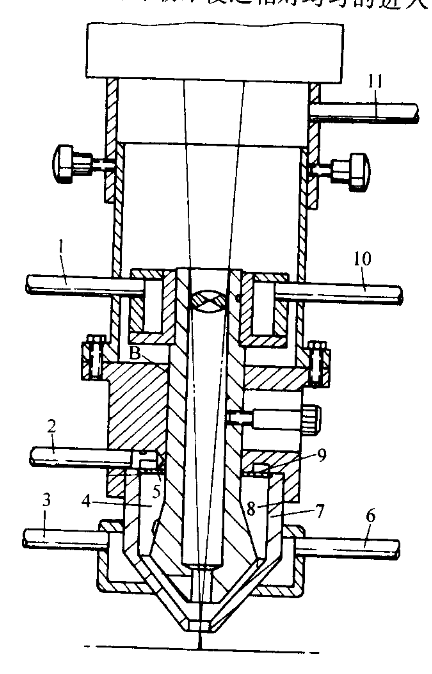


图 6.12-4 激光熔覆喷头

中，内喷嘴 B 的上下移动可调节粉末通道 8 的大小以及其汇聚点的位置。6，3 为冷却液回路，10，1 为另一冷却液回路。管道 11 也注入惰性气体，与激光束同轴向下运动，减少了熔化过程中的火焰，阻止气态等离子体进入腔 7 中，也阻止粉末进入激光通道中。最好将激光聚焦点和粉末汇聚点调至重合，这样可以预先加热粉末，加速沉积。但是，粉末通道 8 是由内外两个锥面形成的圆锥环形粉末通道，输送粉末不稳定，容易发散。

2）单喷点喷头　单喷点是相对于多喷点而言的，粉末汇聚点只有一个。如图 6.12-5a、b 所示为同轴喷头。图 6.12-5a 中粉末通道由四路沿圆周均匀对称分布的独立的管状通道 1，2 组成。图 6.12-5b 中则有八路沿圆周均匀对称分布的独立管状通道。它们的粉末通道最后都汇聚于中心轴线上的一点，达到同轴送粉的效果。图 6.12-5b 中 1、2、4 为石英窗口，用于保护激光光学系统免受粉尘和热量的损害，它们也便于更换。3 为冷却液通道。图 6.12-5c 所示为一种偏置式送粉喷头，对于同轴式也有参考价值。1 中的粉末由输送器送入 6，2 输入的气体通过气体通道 3、5、4 吹到喷嘴末端，约束粉末流，使其汇聚，减小发散。5 是沿圆周方向均匀分布的小空心圆管，它们可以使 3 中的气流在圆周方向相对均匀地分布，吹到喷嘴末端，使气流在以粉末流为中心的圆周方向均匀，从而使粉末流更好地汇聚。

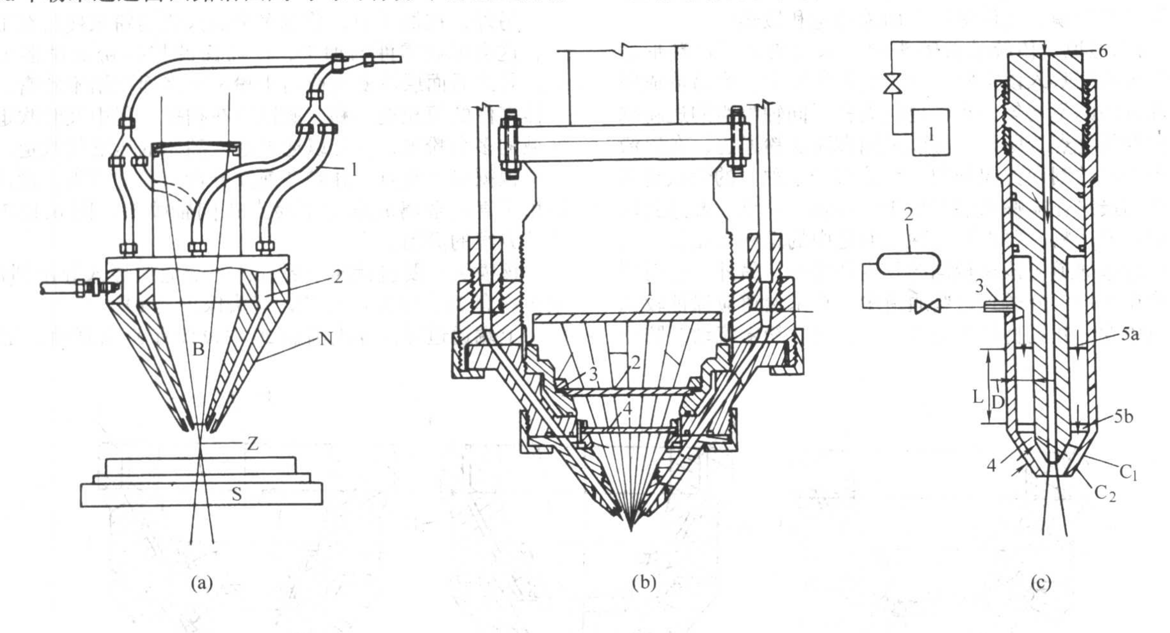


图 6.12-5　几种单喷点喷头结构图

3）多喷点同轴喷头　多喷点喷头具有多个粉末汇聚点。如图 6.12-6 是美国 Optemec Design 公司研制的一种多喷点喷头。这种喷头有四个粉末和激光的汇聚点，如图 6.12-6c 所示。对应地，它有四路激光束可以独立控制。图 6.12-6b 中 48a-h 为填充粉末喷嘴，分两列对称排列于激光两侧；图 6.12-6c 中 48i-j 为轮廓线粉末喷嘴。加工轮廓线时，48i-j 的送粉打开，四个激光束开相应的那一个，其它关闭，与该汇聚点相应的填充粉末喷嘴也打开，这样，轮廓扫描有均布的四束粉末流，保证了扫描的均匀性不受喷头和工作台相对运动的影响，保证轮廓线的质量。填充时，48i-j 的送粉关闭，四束激光能独立开关，并打开填充粉末输送，同时打开可以加快填充速度。图 6.12-6a 中 64a 是填充粉末输送入口，

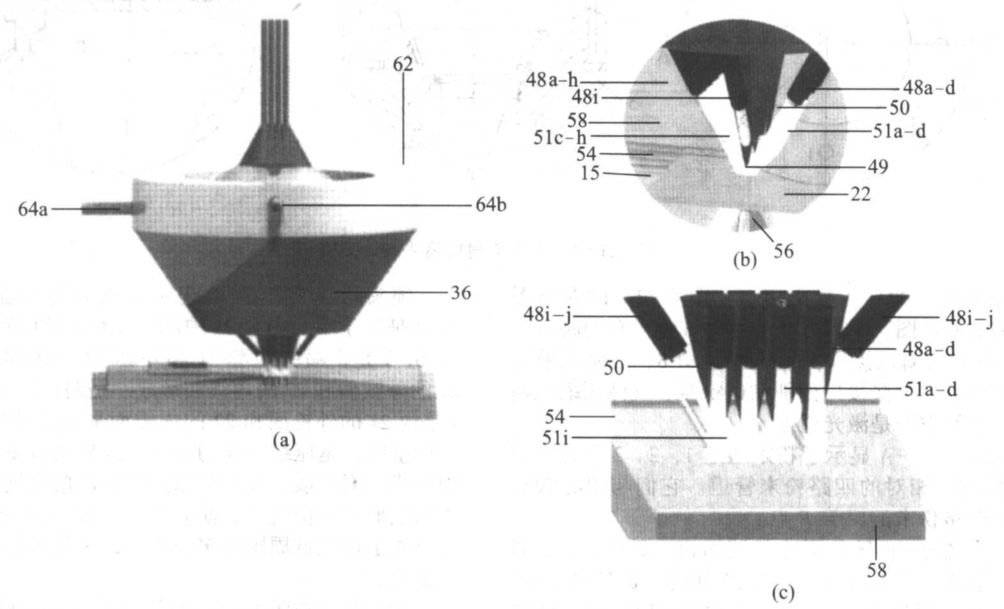


图 6.12-6　多喷点同轴式喷头

64b是轮廓粉末输送入口。

这种喷头四路激光可以独立控制，也可以有选择地组合进行扫描，在不影响加工条件和时间的前提下提高沉积速率。不过由于四路激光排成一列，这种填充具有方向性，需要通过工作台的旋转来改变填充角度。

这种喷头作一些改进，可以得到输送多种材料的喷头。

（3）单喷同轴喷头的设计

1）激光通道　喷头的中心轴是激光通道，其直径应略大于激光光束的直径以利于调节激光的同轴度和焦点。因为激光聚焦镜头是精密零件，要求洁净环境并且温度不可太高，否则会损坏镜头并增大功率损失，所以应有相应的保护装置，如隔离石英镜、气体保护，用来防尘和散热。

2）粉末通道　传统熔覆喷头的粉末通道是圆锥环形通道，粉末由载气吹入该空腔，由于空腔比较大，容易造成粉末在圆周方向的不均匀分布，也就失去了同轴喷嘴的送粉均匀无方向性的优点。所以，可以采用多路送粉通道，在以激光束为中心轴的圆周方向均匀对称分布若干独立的管状粉末通道，它们最终在喷嘴末端汇聚于中心轴上一点。要达到均匀无方向性的送粉，要求这些独立通道中的送粉要相似，因此喷头中这些通道应该有相同的长度和姿态；另外，送粉器也必须将粉末均匀分送到这些通道中。粉末通道应保证较高的表面粗糙度，并且直径不能太小，以利于粉末流动，防止阻塞，这和粉末的粒度、形状等流动性等特点有关。

3）冷却液通道　直接金属成形利用高功率激光熔化金属粉末，在工作点产生高温，喷头紧临工作点，处于高温环境中。所以应用冷却系统来避免喷头温度过高，变形损坏。在喷头内应设计冷却液通道，喷头主要材料应该是耐高温材料，热导率大，利于冷却，如不锈钢；在接近熔池的端部也可以用更强的耐高温材料如陶瓷。

4）压缩气体通道　除了输送粉末用的载气，喷头中还应通入压缩气（通常是保护性惰性气体）来防尘和散热以保护光学镜头，并能在加工点周围形成保护气氛，提高成形质量。

另外，在加工中，总有多余的未烧结粉末残留在工作面上，这会影响零件的加工，使后面的扫描粉末量多于送粉量，导致后面层厚变大或由于粉末太多而烧结不致密。对于实体零件的填充更不利。所以应在扫描过程中及时吹走工作区域的多余粉末，这可以通过通入高压的压缩气吹走。

根据以上要点，并参考前面分析的几种喷头，设计了一种用于直接金属成形的单喷点式同轴喷头，图 6.12-7 所示为该方案的简图。

该喷头主要包括四个部分：上端通道导入导出圆盘 20，喷头内套 21，喷头外套 22，镜头保护套 19。

上端通道导入导出圆盘 20 中设计有粉末通道、压缩气

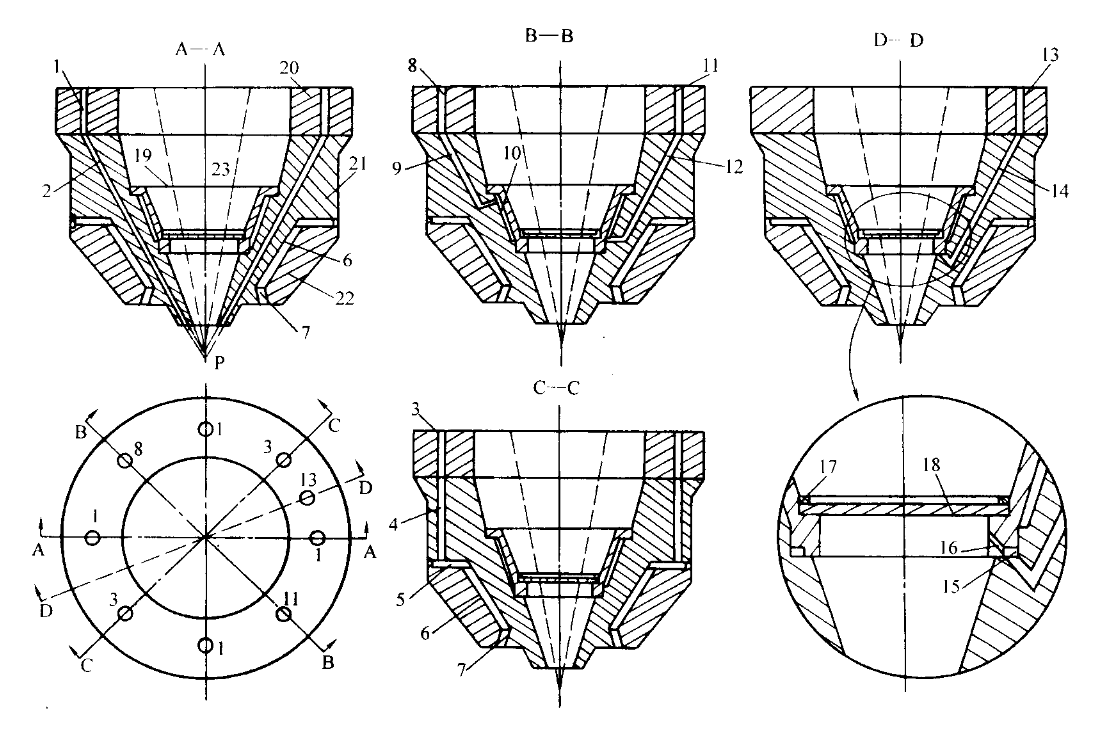


图 6.12-7　单喷点同轴喷头设计简图

体通道和冷却液通道的导入导出接口。图 6.12-7 的左下图是它沿中心轴的俯视图。圆周方向均匀对称分布有四路粉末输入接口 1、冷却液输入接口 11、输出接口 8、三路压缩气体输入接口 3 和 13。这些接口分别和送粉器、气体压缩机通过软管连接。中间空腔是激光通道。

喷头的剖视图 A—A 显示了粉末通道 1，2。2 是处于喷头内套 21 中的与 1 相对的四路粉末管道。它们与中心轴夹角相同，最终四路粉末汇聚于 *P* 点。

喷头的剖视图 B—B 显示了冷却液通道。其中，11，12 为冷却液输入通道。冷却液进入内套 21 和镜头保护套 19 形成的腔 10，然后由通道 9、8 流出。冷却液可以用水。详细设计时应注意 19 和 21 连接处的密封。

喷头的剖视图 C—C 显示了压缩气体通道 3，4，5，6，7。4 是处于喷头内套 21 中的与 3 对应的两路气体输入通道。5，6，7 是由喷头内套 21 和外套 22 形成的环形空腔。6 由 21 的外锥面和 22 的内锥面形成，是向内收的圆锥环形空腔。7 是由 21 的外锥面和 22 的内锥面形成的略向外张开的圆锥环形空腔，是压缩气体的出口。这种出口使气体在加工点周围形成一圈气墙。气体可以是保护性惰性气体，这样不但能为加工形成保护气氛，防止氧化，而且由于气流向外张开，可以吹走加工点周围的多余粉末，避免多余粉末对沉积的不利影响。

喷头的剖视图 D—D 显示了另一路用以保护镜头的压缩气体通道 13，14。14 是处于喷头内套 21 中的与 13 对应的管



状通道。压缩气体为保护气，通过镜头保护套下端边缘上的若干小孔 16 吹出到激光通道中，使内部气压略高于外部，从而气流向外流，带走粉尘和热量，保护镜头，也在喷嘴出口处形成保护气氛。镜头保护套 19 用于防止粉尘污染激光镜头，并隔热以保护镜头，它带有便于更换的石英隔离镜 18。

这种喷头可采用耐高温的材料制造。它的优点是粉末汇聚性好，激光镜头可以得到有效保护，可以形成保护气氛，可以及时清除多余粉末，这些都能提高成形质量

清华大学机械工程系激光加工研究中心已研制出适合于直接制造金属零件的各种规格的同轴送粉喷嘴（见图 6.12-8）和自动送粉器，并已取得两项相关发明专利。该喷嘴具有灵活方便的垂直装卸功能、粉末流的动态均匀化功能、喷嘴内部部件的良好冷却功能、反射激光能量和反弹金属粉末的再利用功能及出口光斑大小可调节功能。自动送粉器由微控制器控制，具备手动和自动编程控制功能，可由各种数控系统编程控制，能均匀连续地将金属粉末输送至工作表面并保证激光制造时的低速均匀送粉。上述同轴送粉喷嘴和送粉器已供应国内单位使用。

1.2.2　熔池温度控制和反馈系统

在激光熔覆快速制造金属零件过程中，熔池温度会因为工件的形状以及多层熔覆过程中温度累计效应发生变化，而熔池的温度会影响熔池的形状，并最终影响成形零件的的尺寸精度以及零件内应力的大小和分布。采用闭环反馈控制系统对熔池内温度实施监控，从而控制激光器的输出功率，确保熔池内温度场的稳定，对于保证制造零件的精度，减少零件的内应力具有重要的作用。

图 6.12-9 为美国 Southern Methodist University 采用的基于红外传感器的三维激光熔覆闭环控制装置示意图。每秒能达到 800 帧的高速摄像机与喷嘴同轴，安装在喷嘴上方，并随其一起运动，这样使得其在不同扫描方向和路径上摄像机与熔池的角度都是垂直的，获取的图像没有扭曲。图 6.12-10a 为一张通过摄像机获取的熔池全貌照片，图 6.12-10b 为经过处理后的熔池图像。

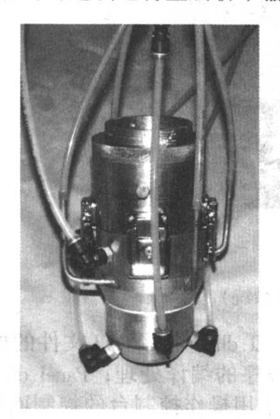


图 6.12-8　清华大学研制开发的激光熔覆快速制造同轴送粉喷头
（清华大学激光加工中心提供）

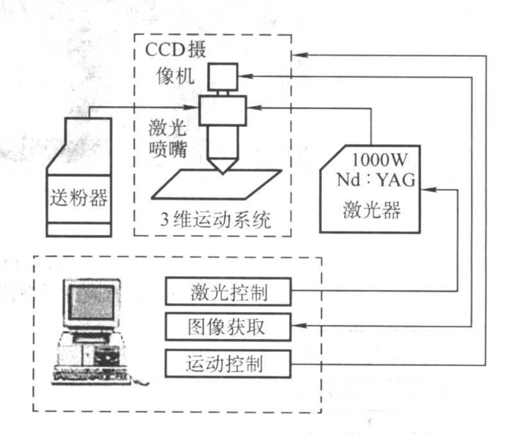
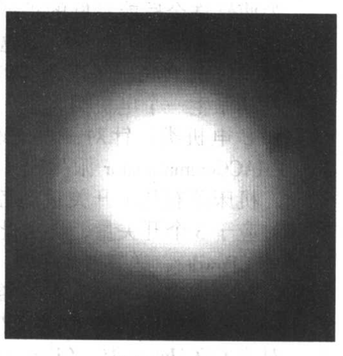
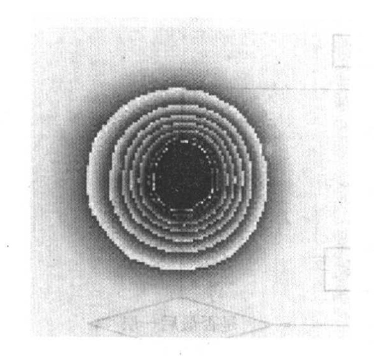


图 6.12-9　基于红外传感器的三维激光熔覆闭环控制装置示意图



(a) 照片



(b) 处理后的图像

图 6.12-10　高速摄像机拍摄的熔池全貌照片及处理后的效果

图 6.12-11 为薄壁结构零件的激光熔覆快速制造。从中可以看出，基体既没有预热，也没有输入热量反馈控制系统的图 6.12-11a 下部宽度明显比上部窄，图 6.12-11b 也存在同样的问题，图 6.12-11c 则上下尺寸基本均匀。

图 6.12-12 为采用 DMD 技术制造的零件在有无高度反馈控制装置下其高度方面的对比。左边的两个零件高度基本相当，右边的零件刚开始成形就在高度方向发生了较大的偏差，无法再进行后续的制造。

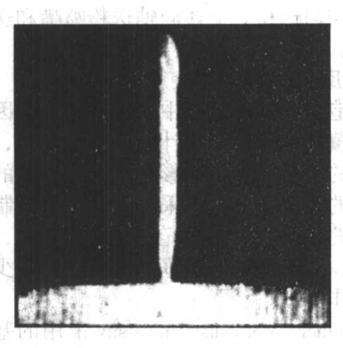
1.3　激光熔覆快速制造技术的软件

快速成形技术的软件系统主要由三部分组成：CAD 造型软件、数据检验与处理软件和控制系统软件。其中，针对具体的工艺及设备，控制软件有其独特性。因此，下面以清华大学激光快速成形中心为中国有色金属研究院开发的 DMD 控制软件为例加以介绍。

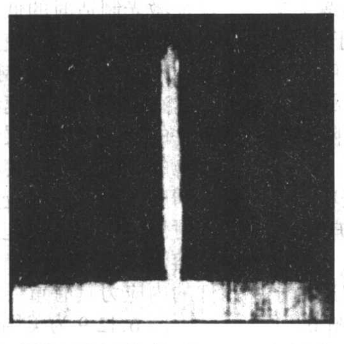
控制软件的作用是使硬件设备自动运行，制造零件。运动控制包括工作台 X、Y 轴运动和 C 轴转动以及喷头的 Z 向运动，辅助控制包括激光、粉末和送气的开关。控制软件按照加工要求合理协调这些运动的控制来制造零件。

工艺流程如图 6.12-13 所示。在每层的加工中，送粉、送气、开激光、喷嘴运动是同时进行的，送气起保护作用，并吹走多余的粉末。

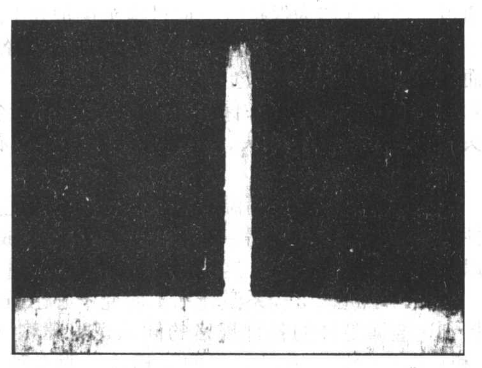




(a) 基体没有预热，也没有输入热量的反馈控制系统



(b) 基体预热，没有输入热量的反馈控制系统



(c) 基体预热，有输入热量的反馈控制系统

图 6.12-11　薄壁结构零件的激光熔覆快速制造

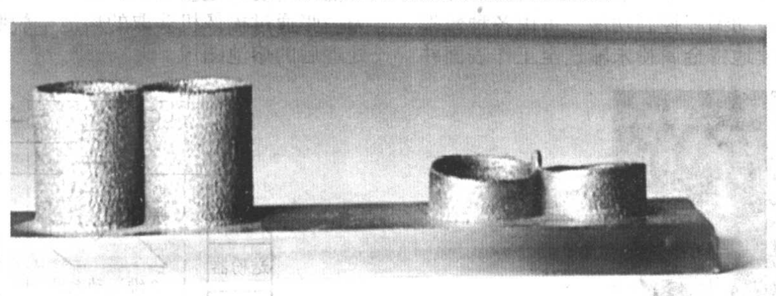


图 6.12-12　DMD 技术制造样品

（左：有高度反馈控制系统；右：无高度反馈控制系统）

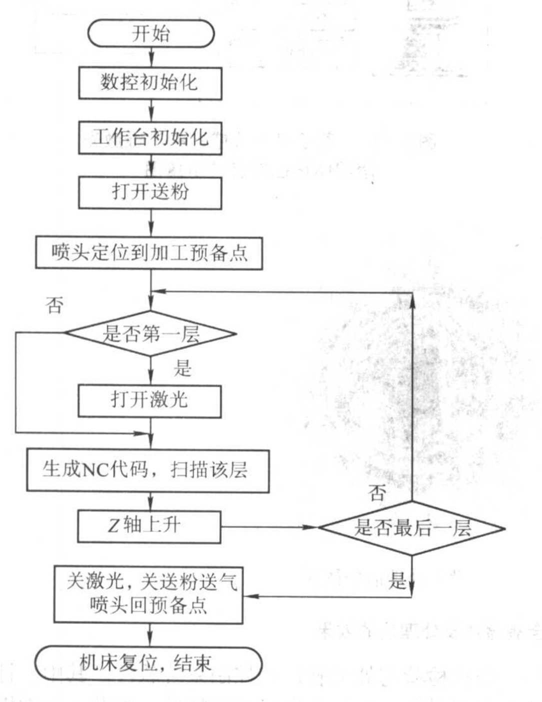


图 6.12-13　同轴送粉 DMD 工艺流程

1.3.1　控制软件的设计

结合数据流和面向对象分析，设计出如图 6.12-14 所示的结构模型。其中类的说明见表 6.12-1。

为使软件具有良好的可维护性和可扩展性，根据结构模型，将软件分成六个部分：一个可执行文件和五个动态连接库。五个动态连接库为：Action.dll、CLI.dll、NC.dll、Panel.dll、PoppyRes.dll。这五个动态连接库分别对应相对独立的功能，如 Action.dll 是与 PMAC 卡通信、数控初始化等操作相关的功能；CLI.dll 包括了 CLI 文件的处理操作；NC.dll 则完成 NC 运动程序的编译处理；Panel.dll 是软件上实现面板控制的功能（不用操作控制台的控制面板）；PoppyRes.dll 包括了软件的一些资源。最后，可执行文件 Poppy.exe 调用各动态连接库运行。这六个部分可以单独调试，使得编程修改调试更方便。

为使软件今后能更好的扩展和重用，对于各个主要对象类，在进一步设计的时候，对这些类再分别进行扩展。如图 6.12-15，对于 PMAC 通讯类 CPMACCommunicator，可以针对电机控制派生一个电机类，进一步电机类可以派生出 *XY* 电机类和 *Z* 电机类；针对一些 PMAC 通用操作（如初始化），从 CPMACCommunicator 派生出 CCommonAction 类；除了电机运动，机床还有几个开关量的控制，因此派生出 COpenClose 类，对应于 3 个开关量，再由此派生出激光开关 CLaser、粉末开关 CPowder、送气开关 CGas 三个类。这样逐步细化，最后实际控制中多是用这些派生类的对象实例。这种扩充细化对于以后软件功能的扩展和工艺的改变，可以灵活的修改软件。对于 CNCMaker 类、CParameter 类的扩展如图 6.12-16 所示，NC 代码主要包括 NC 路径和加工参数，NC 路径则是由 NC 加工点构成，参数类实际使用的是派生类 CDMDParameter，其父类可以对其它工艺扩展它们的相应参数类。

1.3.2　控制软件的实现

控制软件的实现主要包括数控代码的生成、成形过程控制、参数管理及界面的实现。在本工艺中，由于设备的限制，送粉和激光在成形过程中始终打开，且送粉量是一定的，所以起停和加减速时容易形成过堆积、欠堆积或不均匀堆积，影响成形的表面质量和尺寸精度。因而，CLI 文件在转换为数控代码文件之前需要优化。

成形过程控制是控制软件的主要功能。这一部分除了执行生成的 NC 代码，还要加入其他辅助动作：如送粉、送气、激光的开关、设备的准备和 *Z* 轴的升降等。这一过程控制抽象为 CProduct 类，针对本工艺又派生出 CDMDProduct

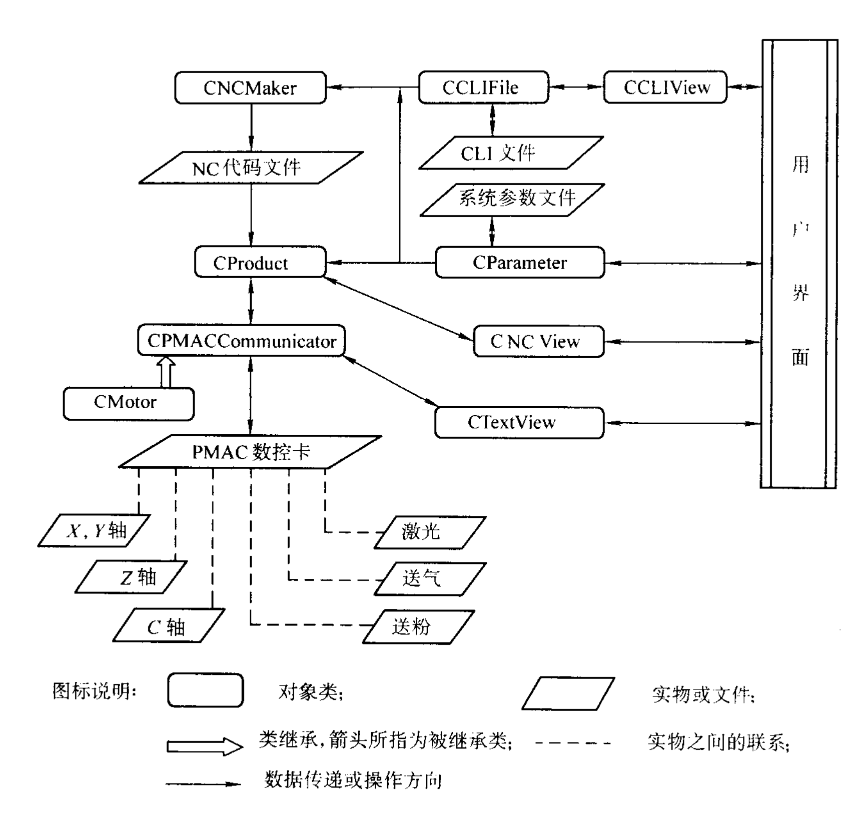


图 6.12-14　软件系统模型结构

表 6.12-1　主要类说明

类名称	说明
CCLIFile	CLI 文件类
CParameter	加工参数类
CPMACCommunicator	PMAC 通信类
CNCMaker	NC 代码生成类
CProduct	成形控制类
CTextView	调试窗口类，包含了在线调试功能
CCLIView	CLI 模型的显示类并对 CLI 文件进行一般的平移，缩放，合并等操作
CNCView	显示设备状态，进行设备初始化，造型控制等操作
CMotor	电机类

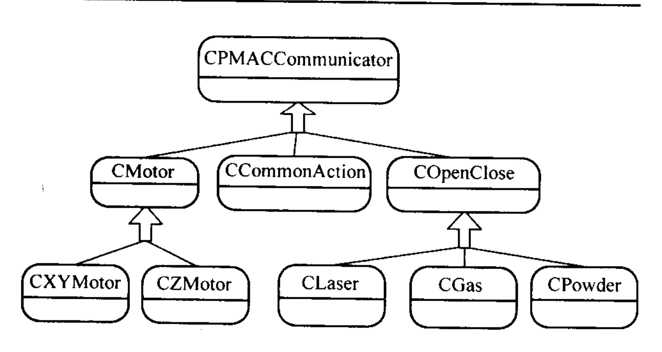


图 6.12-15　CPMACCommunicator 类的扩充

类。在 PC 机和数控卡之间进行 NC 代码的传递相对于代码转化要占用更多的时间，如果处理一层代码，传送一层，加工完一层，再处理下层，这样循环，那么在层与层之间因

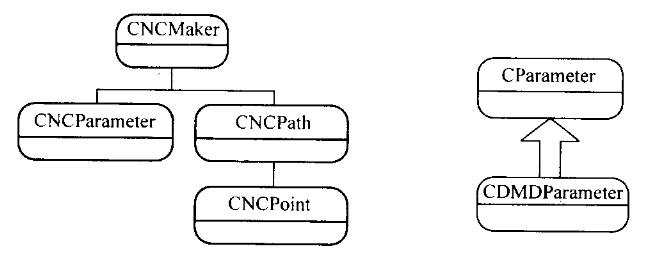


图 6.12-16　CNCMaker 类和 CParameter 类扩展

NC 代码的传递要明显占用一段时间（可达到几秒钟），对于本工艺是很不利的。因为由于硬件设备的限制，激光是通过机械光闸关断，频繁开关会极大地影响其寿命，所以在加工期间激光始终不关，这样在层间有停顿时会在停顿点产生结瘤，严重影响成形质量，而且这也增加了无效的等待时间，降低了成形效率。

解决的方法是实现层间无间断连续加工。PMAC 数控卡对每一个坐标系都有一个循环程序缓冲区，允许在程序执行期间对程序行进行实时下载，并覆盖已被执行的程序行。利用这个特性，可以实现层间无间断的成形加工。定义一定空间的循环程序缓冲区，并在 PC 中开一 NC 代码缓冲区，不断查询两个缓冲区，当 PC 中的 NC 代码缓冲区为空时，PC 生成新的 NC 代码，当循环程序缓冲区中未执行命令行数小于设定最小值时，就可将 PC 的 NC 代码缓冲区中的程序行传送入循环程序缓冲区。NC 代码的转换总是很快的，这样循环缓冲区总有未执行命令行，能够不间断加工，其流程如图 6.12-17 所示。在这里，整个流程的加工动作和辅助动作都已编译成相应的命令行依次存入 NC 代码缓冲区，所以工艺流程体现在“生成新的 NC 代码”模块中。

本系统中参数的设置和修改通过对话框完成，通过 Windows INI 文件进行参数的保存和读写。CDMDParameter 类负责管理本工艺的参数。



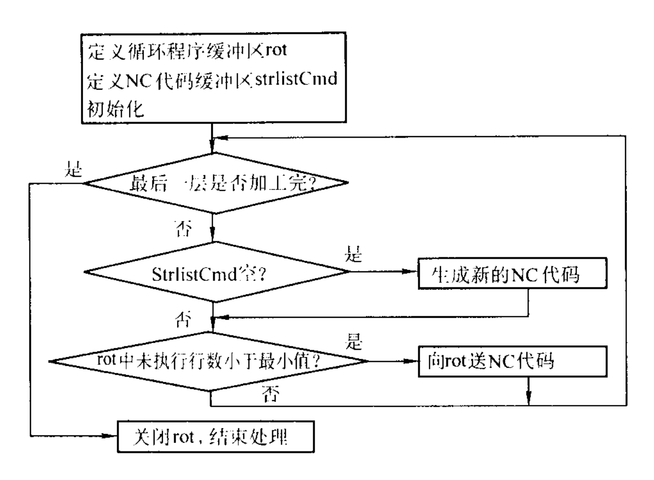


图 6.12-17　不间断成形加工流程

1.4　激光熔覆快速制造技术的工艺研究

激光熔覆快速制造技术利用高能量密度的激光束作为热源，加热熔化金属粉末，同时在基体或已沉积层上形成熔池。为充分利用激光能量，基体表面应能充分吸收激光能量。基体表面以远高于其它任何加热方式所获得的速度被加热、熔化，由于热效应仅集中在基体表明很薄的区域，几乎没有什么能量进入基体，所以在被加热熔化的表层与其它部分之间形成了非常大的温度梯度。冷却时由于金属本身热传导能力强，因此获得极高的冷却速度（可达 10^4 ~ 10^8 K/s）。因此，必须对激光熔覆快速制造技术进行研究，以便合理选择各种技术参数，制造出各项性能指标良好的零件。

1.4.1　一维实验

对材料进行一维扫描实验是为了了解材料的技术性能，获得粉末材料烧结的扫描线宽度 w 和高度 h 与激光功率 P、扫描速度 V 和送粉流量 F 的对应关系，找到合适的匹配。

当在基体上扫描一道时，如图 6.12-18，激光在基体和该道已凝固区交界处形成熔池，熔池和固体之间有固液过渡区，熔池使已凝固区和基体少部分熔化，粉末流入激光熔化区后被加热开始熔化，进入熔池完全熔化，激光沿箭头方向扫过去后，该熔池快速凝固。所以扫描线就由这样的熔池一个个凝固连接在一起，其截面形状如图 6.12-18 右图，表面呈弧形，线宽为其弦长 w，由于热扩散的影响，一般 w 大于激光在熔池处的直径。俯视外形如图 6.12-18 的下图，呈鳞片状。如果激光扫描速度慢，熔池连接紧密，鳞片状不明显。熔池与基体有重熔区，所以实际的层高 h 是熔池高度 H 减去重熔区高度。

在不考虑材料本身的热效应时，可以找到移动热源加工材料时的温度分布图，但由于实际加工中材料的物理性质（颗粒大小、粉末形态和粒度分布等）和化学性质的差异，

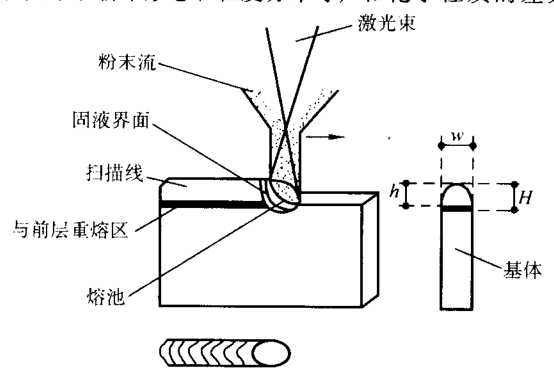


图 6.12-18　一维烧结

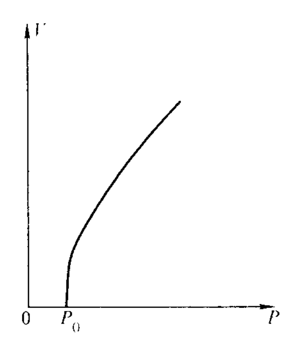


图 6.12-19　材料 \ F \ w \ h 一定时的 $P-V$ 图

一种简便的方法是通过实验确定。对于一定的材料，一定的粉末流量 F，当获得同等的扫描线宽 w 和层高 h 时，激光功率 P 和扫描速度 V 的关系大致如图 6.12-19 所示。P_0 意味着激光功率小于该值时，即使激光不动，也不能烧结。当功率较大时，扫描速度与激光功率接近成正比。

1.4.2　二维实验

实际的零件都是实体的，CLI 文件每层均包括轮廓线和填充线。轮廓线的扫描就是单道扫描，而要达到零件的致密，填充线必须是相连接的，相邻填充线要有一定的重叠，其重叠程度用重叠系数 λ 表示。如图 6.12-20 所示，当前扫描线与相邻的前一道扫描线重叠宽度为 S，则重叠系数 λ 为

$$\lambda = \frac{S}{W} \tag{6.12-1}$$

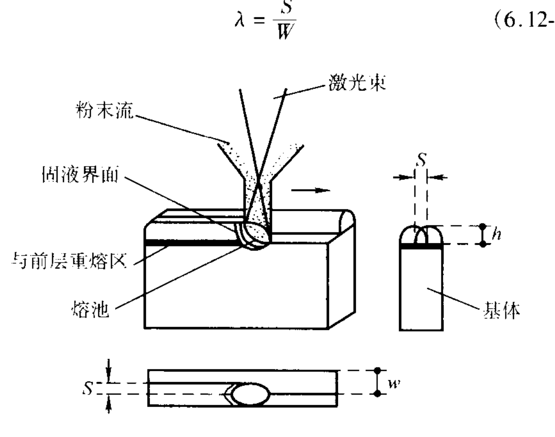


图 6.12-20　二维烧结

由于扫描道的截面是弧形，两条线相邻时，上表面并不平整，为了尽可能达到平整，要通过一维实验找到截面形状较理想（弧度不能太大，又不能太平、高度太小）的参数，同时通过二维实验找到合适的重叠系数。重叠系数太小，会导致零件不致密，太大则重叠部分越来越高，并降低成形效率，重复熔化部分变多，增大热应力从而引起较大变形。

1.4.3　三维实验

三维实验是在二维实验的基础上层层堆积的生长造型。如图 6.12-21 所示，层与层之间有重熔区，每层形成时都要重熔前层上表面的一薄层，这样才能达到层与层之间的冶金结合，形成致密组织。实际熔池高度为 H，实际层高为 h，重熔部分高度为 $\Delta h = H - h$。Δh 主要和扫描速度 V，激光功率 P 有关。当 P 越小、V 越大时，Δh 越小，反之越大。Δh 太小则层间不致密，容易剥离，侧面粗糙；Δh 太大则降低成形效率，另外重熔部分太多，热应力大，变形也大。

三维实验要找到和 P、V 对应的合适的 h 值。

1.4.4　性能分析

通过变换激光模式、激光功率、沉积速率、坐标轴数和



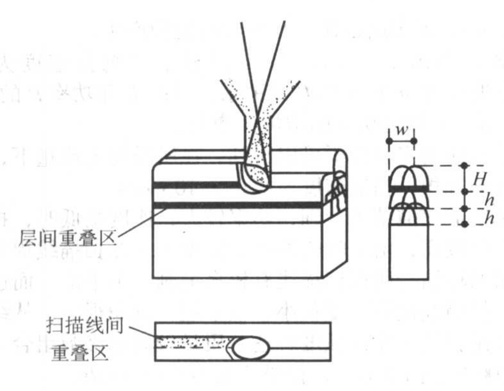


图 6.12-21　三维烧结

金属运送方式可得到优化的制造速率、零件密度、晶粒结构和表面质量。美国 Sandia 国家实验室制造的 Ti－6Al－4V 零件相对密度达 99.996%，伸长率和强度与传统方法相当。

表 6.12-2 为采用 LENS 技术制备的材料力学性能，结果表明材料具有很高的抗拉和屈服强度，延伸率也与传统方法相当。

表 6.12-2　材料力学性能数据表

材料	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
316 不锈钢(垂直方向)①	794	449	66
316 不锈钢(平行方向)①	807	593	33
316 不锈钢退火状态	587	242	50
625 合金(垂直方向)①	932	635	38
625 合金(平行方向)①	932	518	37
625 合金退火态	835	400	30
Ti－6Al－4V①	986～1 034	896～931	9～12

① 为采用激光熔覆快速制造技术制备。

采用激光直接制造技术 DLF 制造的材料性能测试结果同样表明：激光熔覆快速制造的零件屈服强度和极限强度达到或优于传统制造方法制造零件的性能，延伸率大体相当。

1.4.5　微观结构

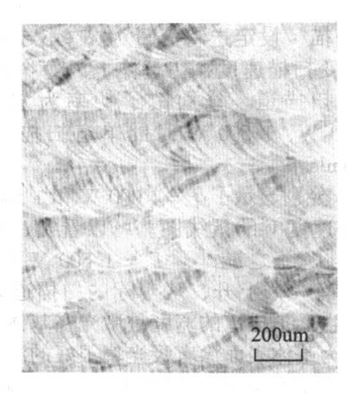
德国汉诺威激光中心采用最高功率为 3 kW 的 CO_2 激光器和一套计算机数控的三维加工系统，进行钴基和镍基合金的激光熔覆快速制造，并制备了具有垂直和倾斜薄壁的金属部件。他们发现不论使用什么材料，对熔覆部分的结构检查均发现其组织细小，其中有部分树枝晶结构。对材料的测试表明，熔覆零部件的密度近百分之百，抗拉强度和断裂强度与常规的金属板材类似。

图 6.12-22 为采用 DLF 技术制造的 316 不锈钢零件的微观结构图。其中图 6.12-22a 为沉积层间结构；图 6.12-22b 为层内胞状凝固组织。从图 6.12-22a 中可以看出，零件非常致密，层与层之间搭接的熔覆层可以保证材料的冶金结合。从图 6.12-22b 中可以看出，零件的微观组织也十分细小。

1.4.6　热应力变形和缺陷分析

在扫描过程中，激光加热产生瞬态和非均匀的温度分布，材料受热膨胀，不同区域发生不同程度的膨胀，产生不同的热应力，冷却收缩会产生变形，如图 6.12-23 所示，当上层冷却收缩，由于已沉积层的约束而产生拉应力，一层层结累，就导致整个薄壁的翘曲变形。

当这种拉应力过大而超过当时温度下的材料的抗拉极限强度时，就会产生裂纹，导致成形失败。特别是当零件和基体部分裂开脱离时，零件各部分向基体的传热状态不相同，使层高不稳定，大大降低成形质量。



(a) 层间结构



(b) 层内胞状组织结构

图 6.12-22　采用 DLF 技术制造的 316 不锈钢零件的微观结构

减小变形和避免裂纹缺陷的方法是尽可能选择膨胀系数小并且和基体接近的粉末材料。另外，在成形前预热基体，使其升到一定高的温度（300～500℃），也有利于渐小变形，防止裂纹产生。基体下垫耐火砖减缓基体的散热，使其与零件整体散热速度接近，也可减小变形。成形零件前先用较高功率在基体上成形一定高度的基础层，使之与基体连接良好，再在基体上成形零件。

成形前应将粉末烘干，防止熔融冷却过程中产生气孔。另外，高温下极可能出现氧化现象，解决方法是吹保护气，一般常用的气体是氮气和氩气。



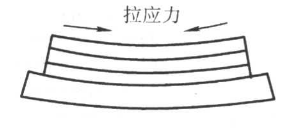


图 6.12-23　扫描线变形

1.4.7　金属零件直接制造实例

（1）316L 不锈钢成形

试验采用的 316L 不锈钢粉末的化学成分见表 6.12-3，粉末粒度 76 μm。

表 6.12-3　316L 不锈钢粉末的化学成分（质量分数）　%

材料	Ni	Cr	Mo	Fe
316L 不锈钢	12～14	16～18	2～3	余量

试验基板的材质为 45 号钢，大小为 100 mm×50 mm×10 mm。为提高基板对激光能量的吸收，在其表面涂覆了增强激光吸收率的涂层。试验设备为一台横流电激励 CO_2 连续波激光器，激光波长 10.6 μm，功率可调节范围 0～2 kW，最大输出功率 2.2 kW，高阶模。

1）单道扫描　设定送粉流量为 $F=6.5$ g/min，在一定的功率下，改变扫描速度，在基体上以每个速度扫描一道线，得到一组扫描道。分别做了功率为 600 W、800 W、1 000 W、1 200 W、1 500 W 时的单道扫描，扫描速度从 2 mm/s到 30 mm/s。

图 6.12-24 分别显示了 $P=1\,000$ W 和 1 500 W 时的扫描线宽 w 和扫描速度 V 的折线图。可以看出，P 一定时，随着 V 的增大，w 随之减小。$P=1\,500$ W 时，在速度为 11 mm/s时，w 有一个上升，从实际的扫描道看到，这时几乎没有沉积产生，扫描道的宽度是激光在基体上直接熔化凝固的痕迹，因为基体表面涂有吸光率很好的涂层，所以相对于产生金属粉末沉积时的宽度稍大。$P=1\,500$ W，V 大于 10 mm/s时的沉积已经很薄。

图 6.12-25 分别显示了 $P=1\,000$ W 和 1 500 W 时，层高 h 和扫描速度 V 的折线图。可以看出，P 一定时，随着 V 增大，h 随之减小。$P=1\,500$ W，V 大于 10 mm/s 时，层高小于 0.1 mm，沉积层很薄，几乎没有沉积产生。

图 6.12-26 和图 6.12-27 分别显示了扫描速度为定值 5 mm/s 时线宽 w 和功率 P 的关系、层高 h 和功率 P 的关系，可见，w、h 均随功率的增加而增大。

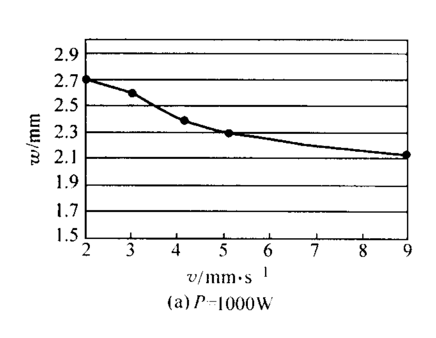
从上面的实验分析可以看到，在所设粉末流量下，要产生有效的沉积，扫描速度一般小于 10 mm/s。

从单道扫描结果看到，功率较大，速度很低时，扫描线截面弧度较高，由于吸收的能量密度大，在扫描线周围有多余粉末的粘结，所以扫描线有较多毛刺，不平滑。而速度太大时，扫描线截面弧度很小，很平坦，沉积很少。从结果中可以选出扫描线截面弧度合适，质量较高的参数组合，如功率在 800 W 到 1 000 W，扫描速度为 4 ~ 5 mm/s。

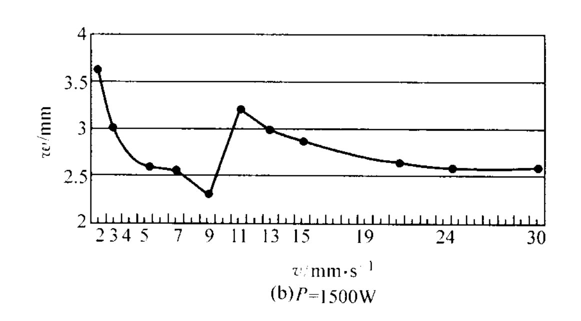
实际加工时的层高 h 的测定应该通过单道多层叠加扫描后，测出平均高度。如在 $F=6.5$ g/mm，$P=1\,000$ W，$V=5$ mm/s时，测得 h 约为 0.3 mm。

2）填充扫描　通过单道扫描实验找到合适的 P、v 参数进行填充扫描实验。填充扫描参数设为 $P=800$ W，$v=4$ mm/s，扫描线宽 $w=3$ mm。实验发现，λ 大于 0.5，接近 1 时，同一填充层的高度越来越高；λ 小于 0.5，接近 0 时，填充线之间有明显的凹凸感。最后选择合适的 λ 为 0.5。此时，同一填充层高度也有增加趋势，分析认为，由于后来的基体温度逐渐升高，基体本身能量密度变大，所以实际熔融时的能量密度大于先扫描的扫描道，扫描线的 w 和 h 也相应增大，而设定的 λ 没变，实际的重叠系数变大，所以层高增大。因此，在成形时，为了使沉积扫描基本获得均匀的热状态，应先对基体扫描预热，并在基体下放耐火砖，减缓热量散发。

通过以上研究得到合适的成形参数用于实际零件成形。采用 $F=6.5$ g/min，$P=1\,100$ W，轮廓扫描速度 $v=5$ mm/s，$w=3$ mm，$h=0.3$ mm 成形如图 6.12-27a 所示零件。不需要沉积的部分为空程过渡，由扫描实验知速度大于 40 mm/s 就基本没有沉积产生，所以选空程速度为40 mm/s，如果太大，加减速时可能导致机床振动和电机丢步。该零件底面为 35 mm×35 mm 的正方形，顶面为直径 25 mm 的圆，中间是从正方形到圆的过渡体，棱线对中心轴有一定扭曲，高80 mm。这种零件用传统方法加工很复杂，用直接金属沉积成形则和普通零件的金属沉积成形工艺一样。

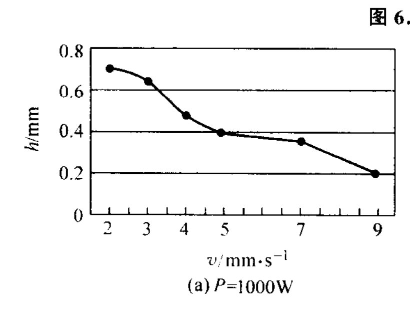


(a) P=1000W

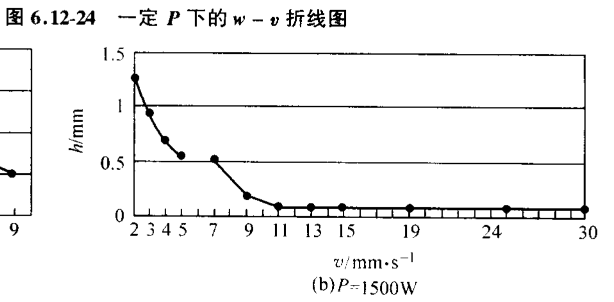


(b) P=1500W

图 6.12-24　一定 P 下的 $w-v$ 折线图



(a) P=1000W



(b) P=1500W

图 6.12-25　一定 P 下的 $h-v$ 折线图

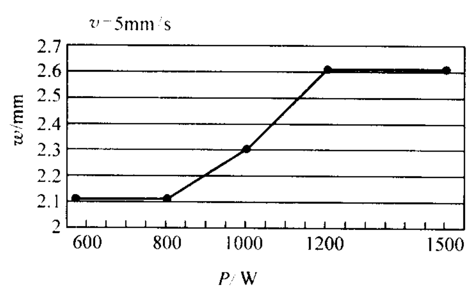


图 6.12-26　一定 v 下的 $w-P$ 图

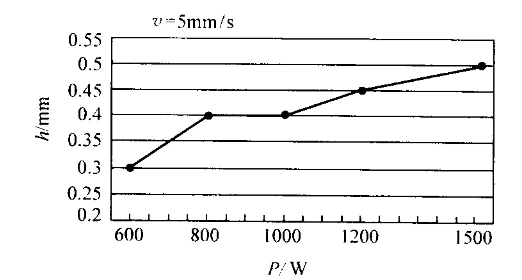


图 6.12-27　一定 v 下的 $h-P$ 图



成形前，基体垫耐火砖，基体预热扫描，并做 5 mm 高的基础层（35 mm × 35 mm 正方形框，就是零件底面延伸 5 mm）。等送粉、热状态稳定且和基体连接良好后开始零件制造。成形的零件如图 6.12-28c 所示，6.12-28b 为现场成形过程。

（2）663 锡青铜成形

此外，选用如下工艺参数：激光输出功率 600 ~ 800 W，焦点光斑直径 1.0 mm，送粉速度 3 ~ 6 g/min，粉末载气（保护气）为氮气，扫描速度 3 ~ 5 mm/s，进行了 663 锡青铜的成形。成形件见图 6.12-29。

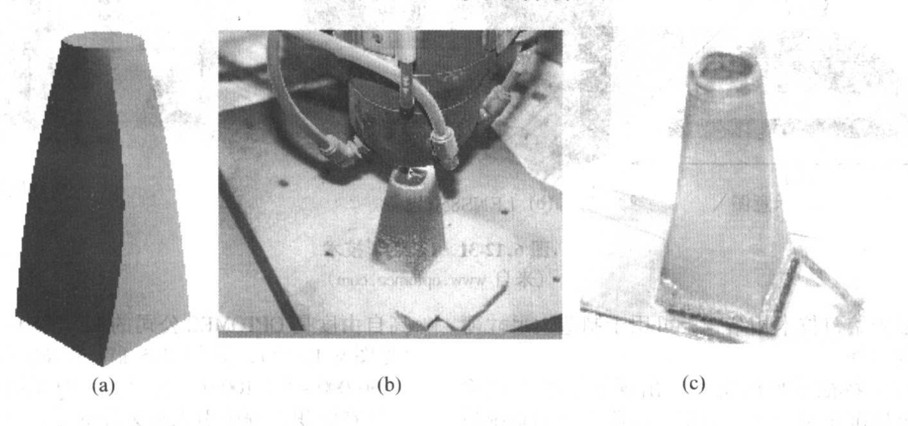


图 6.12-28　316L 成形零件模型和成形
（清华大学激光快速成形中心提供）

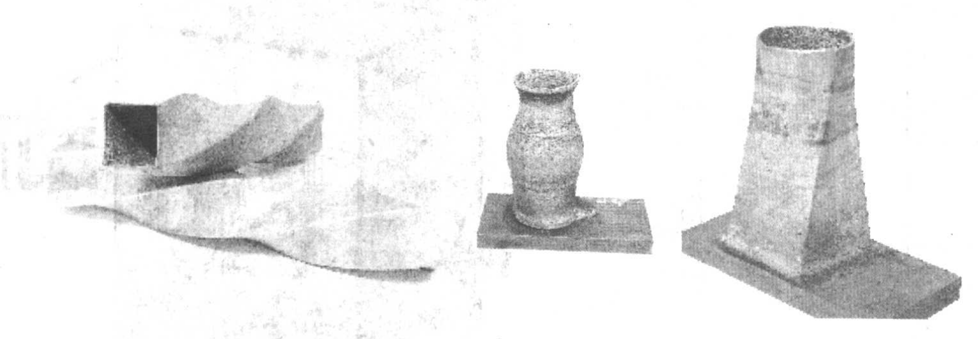


图 6.12-29　663 锡青铜直接沉积零件
（清华大学激光快速成形中心提供）

1.5　尺寸精度和表面粗糙度分析

激光熔覆快速制造技术制造的零件尺寸精度主要取决于移动工作台的精度，并受多种技术参数的影响，其中，LENS 技术在 X、Y 平面为 ±（0.05 ~ 0.075）mm，在 Z 轴方向上的精度为 ±（0.25 ~ 0.4）mm；表面粗糙度高，相当于砂型铸件的表面粗糙度，在使用前需进行精加工。

采用 DLF 技术制作了一个横截面为 7 个孔分布的六边形柱（图 6.12-30），柱高 356 mm，所用粉末材料为 Inconel690 合金（58% Ni，29% Cr，9% Fe），成形技术参数为：激光功率 160 W，扫描速度 12.7 mm/s，层高 h 为 0.25 mm，熔池高度 H 为 0.27 mm，送粉速度约为 9 g/min，氧气分压低于 10 ppm，沉积速度为 0.04 lb/h，总共用时 172 h。

1）尺寸精度　7 个孔中 6 个阵列孔的直径误差在 ± 0.05 mm内，它们的圆心与该阵列所在圆圆周的偏差在 ± 0.13 mm内，从横截面中心到六边形边中心的半径误差在 ± 0.076 mm。总体上来说，该零件具有较高的尺寸精度。

2）表面粗糙度　表面粗糙度为 $R_a12\ \mu m$，与熔模铸造零件的精度相当。

1.6　激光熔覆快速制造技术的主要研究单位

典型的激光熔覆快速制造技术有激光近形技术 LENS（laser engineering net shaping）、直接光制造技术 DLF（directed light fabrication）、直接金属沉积技术 DMD（direct metal deposition）和激光添加制造技术 LAM（laser additive manufacturing）。采用上述技术已经制造出铝合金、钛合金、钨合金等半精化的毛坯，其精度已超过传统闭式模锻的水平，而质量也达到甚至超过整体锻压所达到的金属内部质量，完全可以取代锻件，在航天、航空、造船及国防等领域具有极大的应用前景。主要研究单位如下。

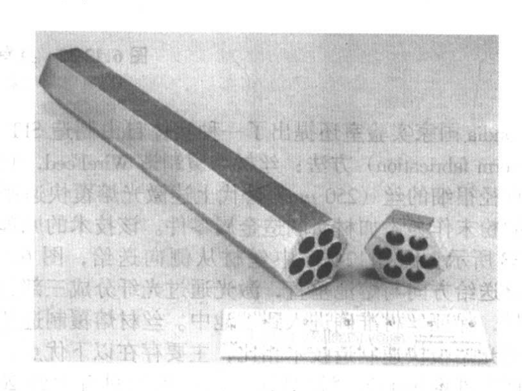
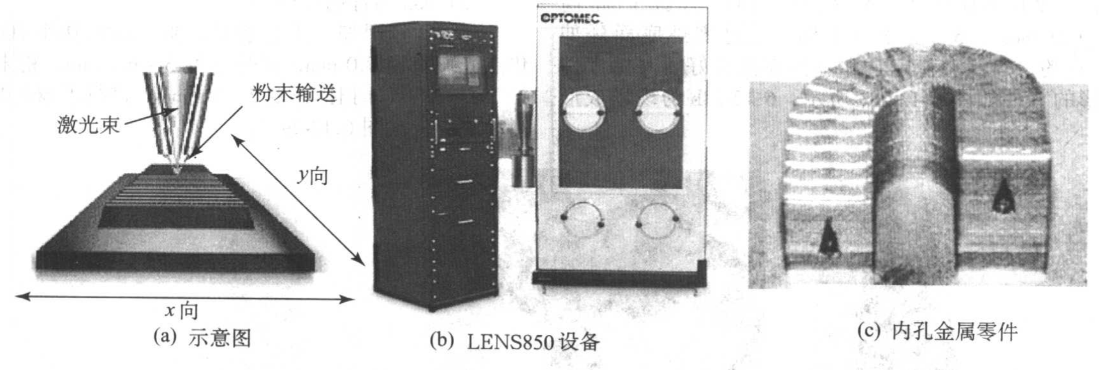


图 6.12-30　采用 DLF 技术制造的 Inconel690 合金带孔六方零件

1）美国 Sandia 国家实验室　他们开发的工艺名称为激光近形制造技术 LENS™，这也是最早提出来的一种激光熔覆快速制造技术，它利用聚焦的激光在金属基体上形成熔池，同时喷嘴将金属粉末喷射到熔池里熔化沉积，层层叠加生成金属零件（如图 6.12-31 所示）。它将快速成形中的选择

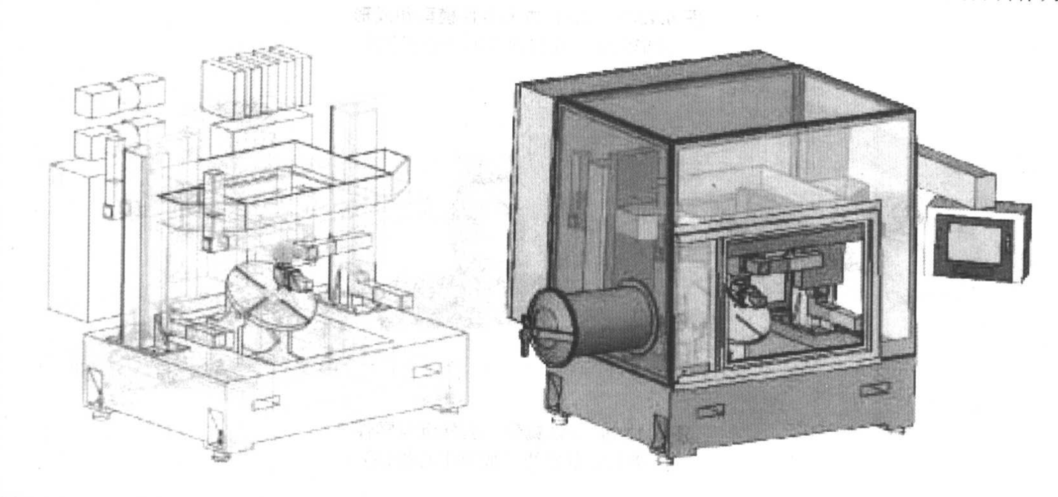


(a) 示意图　(b) LENS850设备　(c) 内孔金属零件

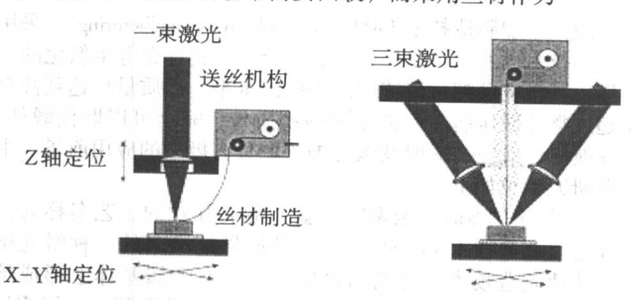
图 6.12-31　LENS™技术
（来自 www.optomec.com）

激光烧结技术和激光熔覆技术相结合，可用于制造大尺寸薄壁形状的整体结构零件。

为了解决悬臂类特征零件的沉积，出现了两种解决途径：其一是增加金属沉积系统的自由度，目前采用的系统最高自由度是 OPTOMEC 公司的 LENS850－R，其有 7 个自由度（见图 6.12-32），采用 3.5 kW 的 Nd：YAG 激光器，售价在 $ 830 000 ~ $ 1 100 000 之间。DMD 系统也有 5 个自由度。其二是在沉积过程中引入易去除的低熔点材料作为支撑。


图 6.12-32　具有 7 个自由度的 LENS850－R 设备
（来自 www.optomec.com）

Sandia 国家实验室还提出了一种实体自由制造 SFF（solid freeform fabrication）方法：丝材熔覆制造 WireFeed，它是用一种直径很细的丝（250 μm）替代上述激光熔覆快速制造技术中的粉末作为添加材料制造金属零件。该技术的原理如图 6.12-33 所示，图 6.12-33a 中丝材从侧向送给，图 6.12-33b 中丝材送给方向与熔池垂直，激光通过光纤分成三部分包围着丝材，保证丝材准确进入到熔池中。丝材熔覆制造技术与其它激光熔覆快速制造技术相比，主要存在以下优点。①为了保证零件堆积的连续性高速送给的粉末只有大约 20% 参与了成形，大部分的粉末需要回收，而采用丝材作为熔化材料，给料机构可以精确控制材料的送给，利用率高。②粉末流束不易控制，需要复杂的同轴送粉喷嘴和送粉器以保证成形的精度；丝材却非常容易控制。③激光熔覆快速制造技术对粉末的粒度分布和成分要求极高，而大多数材料主要以丝的形式供应。目前，该技术还在研究中。



(a) 丝材侧向送给装置　(b) 改进的丝材正向送给装置

图 6.12-33　WireFeed 技术示意图

2）美国 Las Alamos 国家实验室　他们开发的工艺名称为激光直接制造技术 DLF，具体制造过程为：首先从 CAD 实体模型产生 NC 加工路径；然后利用该加工路径信息驱动送粉系统和激光束，粉末通过与激光束同轴的管道送给。该技术与 LENS 技术类似，都是用激光去熔覆金属粉末，不同的是 DLF 技术采用的是 CNC 加工路径格式，而 LENS 采用的是 STL 格式。该系统能实现 5 轴运动，并提供 4 种不同成分的粉末以便加工过程中随时改变零件成分，制造零件时在氩气气氛保护下工作，氧气分压低于 10×10^{-6}。激光直接快速制造技术可用于制造大尺寸薄壁形状的整体结构零件，这种零件用传统的铸造方法几乎是不可能造出的。激光直接快速制造技术还可用于加工活性金属如钛、镍、钽、钨、铼及其它特殊金属，它能提供良好气氛的工作环境，材料浪费少。激光直接快速制造技术还可用于制作模具以及修复模具。美国制造中心（National Center for Manufacturing Science）的评估结果表明利用激光直接制造金属模具可使时间缩短 40%，工序由原来的 62 步减少为 7 步。

利用激光直接制造技术 DLF 制造出了带有半球、直壁、通孔、尖角的零件（如图 6.12-34 所示），加工材料包括 AISI 316 和 400 不锈钢，FeNi 合金，AlCu、AgCu 合金，P20 工具钢，Ti、W、Re 合金，以及钛铝、镍铝等金属间化合物。



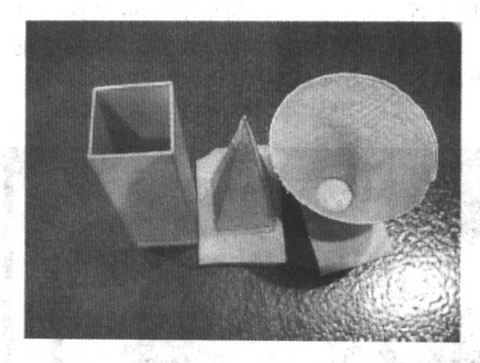


图 6.12-34 采用 DLF 技术制作的各种零件

3）美国密西根州 POM（Precision Optical Manufacturing）公司　他们开发的工艺名称为 DMD，与 LENS 技术类似，DMD 技术也是采用 CO_2 激光器和一套送粉系统制造接近净形的金属薄层，然后进行精加工得到所需的尺寸精度。不同的是 DMD 有一套基于视觉的双反馈控制系统能对熔池进行闭环控制（如图 6.12-35 所示）。图 6.12-36 为采用 DMD 技术制造具有内流道结构零件的示意图。所用材料目前为铜基合金、镍基合金、工具钢和不锈钢，该设备还能制造功能梯度材料。DMD 研究的重点之一是对昂贵的模具进行修补，而不是制造新的模具或零件，重点之二是采用 5 轴联动装置制造几何形状复杂的零件。

4）美国 AeroMet 公司　他们开发的工艺名称为激光增材



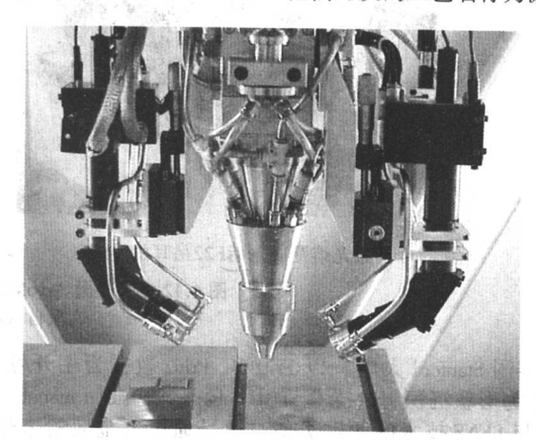
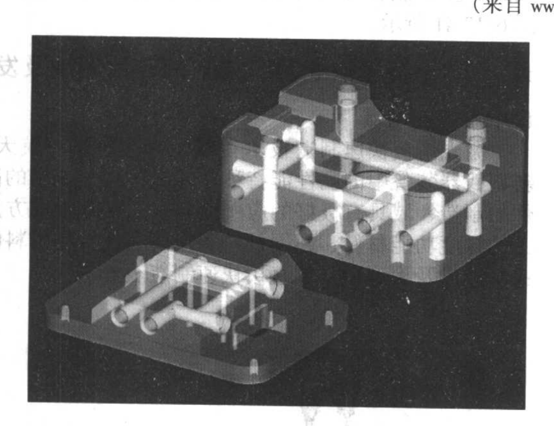


图 6.12-35 DMD 设备及反馈控制系统
（来自 www.pom.net）



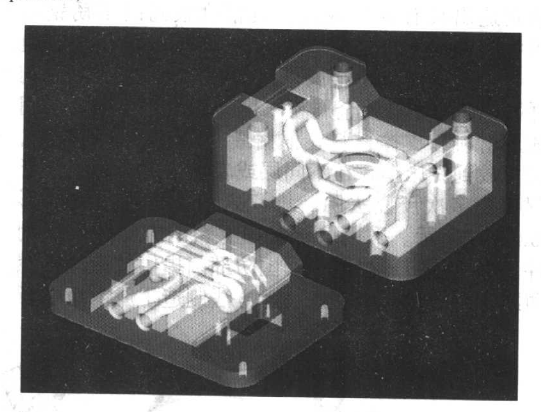
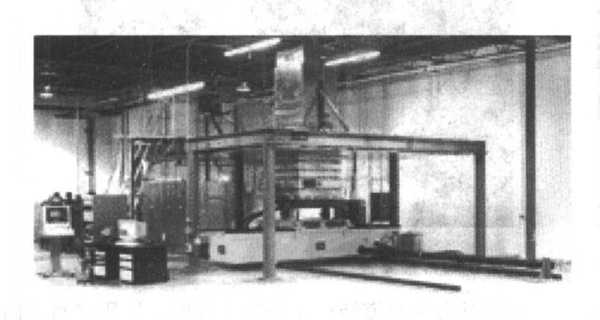


图 6.12-36 采用 DMD 技术制造具有内流道结构零件的示意图
（来自 www.pom.net）

制造技术 LAM，也是采用激光去熔化金属粉末层层堆积成形，其主要特点是采用的激光器为 19 kW 的大功率 CO_2 激光器，成形室的尺寸为 3 m×3 m×1.2 m，可以进行大型零件的毛坯制造。图 6.12-37 为采用大功率激光器的激光增材制造技术设备以及制造的金属毛坯。该公司的重心主要集中在航空工业中的大型钛合金零件的制造上。波音、洛克希德等公司证实 LAM 技术制造的零部件在静强度和疲劳强度方面已经超过了传统技术制造的零件。AeroMet 公司采用钛合金制造了很多实际使用的零件，诸如法兰盘、飞机骨架中的一些结构件等。由于所使用的激光器功率已达到 19 kW，因而其制造速率很高，最大的零件尺寸已达到数米见方。最近，该公司的研究结果有了实质性的突破，进入到了实际应用阶

段。据报道，该公司生产的3个Ti－6Al－4V激光增材成形零件已经获准将在实际飞机上使用。这3个零件分别是F－22上用的一个接头件、F/A18－E/F的机翼翼根吊环以及F/A－18E/F上的一个用于降落的连接杆。其中，F－22上的两个全尺寸接头满足疲劳寿命谱的两倍要求（图6.12-38），F/A－18E/F的翼根吊环满足疲劳寿命4倍要求，随后静力加载到225%也不破坏，而降落用的连接杆满足飞行试验要求，寿命超出要求30%。这些钛合金零件不仅性能超出传统技术制造的零件，由于材料及切削加工的节省，其制造成本降低20%～40%，生产周期也缩短80%。



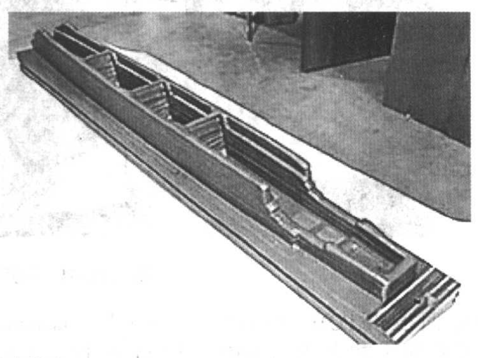
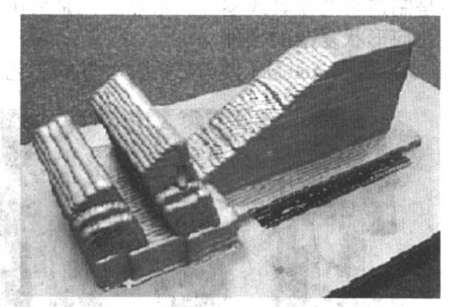
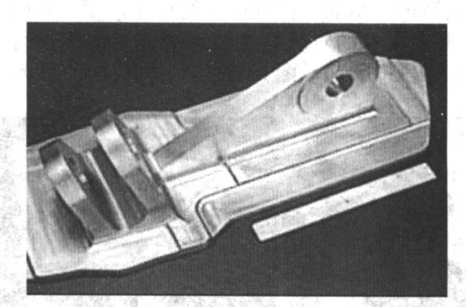


图6.12-37 激光增材制造技术LAM

（来自www.aeromet.com）



(a) 激光熔覆成形后F22吊耳的毛坯



(b) 机加工后F22的吊耳零件

图6.12-38 美国AreoMet公司制造的F22的钛合金吊耳

（来自www.aeromet.com）

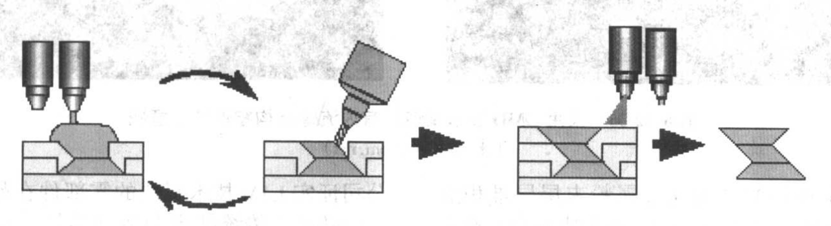
5）美国Stanford大学 以Fritz B. Prinz教授为主开发，技术名称为形状沉积制造技术SDM（shape deposition manufacturing），与LENS技术的原理类似，也是通过将金属粉末熔化沉积，逐层堆积成型出工件。与LENS技术不同之处是采用铣削方法去除冗余材料。经过反复沉积、去除、逐层成型，可直接制造出具有复杂内流道且精度较高的不锈钢叶片。该技术将两种成形方法——去除法和离散-堆积法有机地结合在一起，迅速制造出金属件（包括零件与模具）。利用2.4 kW的YAG激光器使金属粉末熔化后沉积下来，所用材料包括成形材料和支撑材料。根据最终零件形状的要求，将沉积后试样放到铣床上，在不同层或者铣削成形材料或者铣削支撑材料。多次反复去除、堆积之后，得到最终的形状，如图6.12-39所示。采用熔化支撑材料的方法，最后则得到金属件。该实验室还根据美国国防部门提供的旋翼机螺旋桨特殊曲线，用形状沉积制造技术方法制造了厘米级飞行器，并进行了稳定性和控制研究，对快速研制微小型新型飞行器起了重要作用。

SDM技术综合利用了快速成形技术制作复杂形体与机加工得到高精度零件这两种优点，可以用来制造由不同材料组成的、甚至能在零件中嵌入电子感应元件，如图6.12-40，图6.12-41所示。

1.7 激光熔覆快速制造技术的应用领域及发展方向

1.7.1 应用领域

激光熔覆快速制造技术在新型汽车制造、航天、航空、新型武器装备中的高性能特种零件和民用工业中的高精尖零件的制造领域具有极好的应用前景，尤其是常规方法很难加工的梯度功能材料、超硬材料和金属间化合物材料的零件快速制造以及大型模具的直接快速制造上。



（a）示意图 （b）采用SDM技术制造的零件

图6.12-39 形状沉积制造SDM技术

（来自www-rpl.stanford.edu）

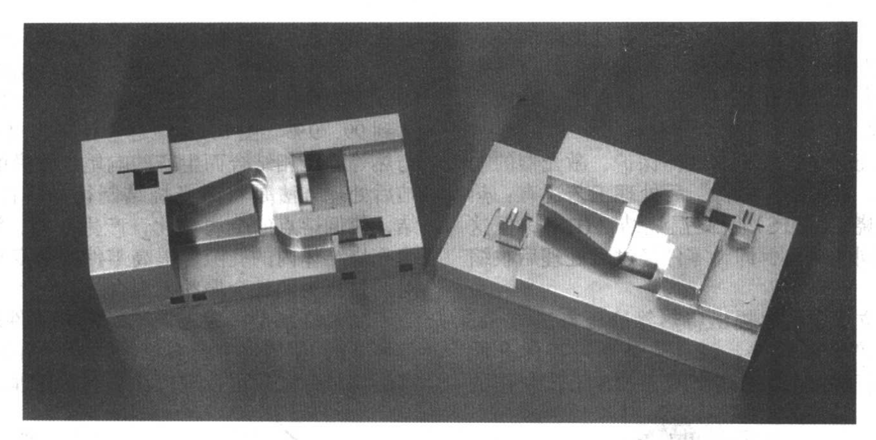


图 6.12-40　由多种材料组成的注塑模具
（来自 www-rpl.stanford.edu）

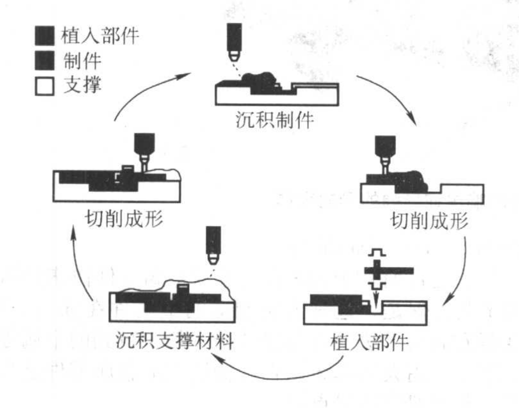


图 6.12-41　嵌入式零件的制造
（来自 www-rpl.stanford.edu）

激光熔覆快速制造技术的应用领域主要包括：

1）特种材料复杂形状金属零件直接制造；

2）含内流道和高热导率部位的模具；

3）模具快速制造、修复与翻新，表面强化与高性能涂层；

4）敏捷金属零件和梯度功能金属零件制造；

5）航空航天重要零件的局部制造与修复；

6）特种复杂金属零件制造；

7）医疗器械等。

目前激光熔覆快速制造所采用的材料主要为由不同膨胀系数组成的铬镍铁合金 Inconel718、625 和 690，不锈钢 304 和 316，H13 工具钢，钨，钛合金 Ti6Al4V 和磁性 NdFeB 等。清华大学机械系激光加工研究中心基于 LRFM 系统制造了 973 项目“天体高能辐射的空间观测与研究”中子课题的硬 X 射线调制望远镜准直器，该零件材料为高熔点高密度钨基合金，薄壁圆筒状结构，内含筋板，用传统制造技术极难加工完成。

1.7.2　发展方向

激光熔覆快速制造金属零件有两个主要的发展方向，即大型零件的毛坯制造和小型功能梯度复杂零件或多材料复杂零件的制造。

对于大型零件的毛坯制造，用直接金属制造可以节约昂贵的大型模具开发成本，加速制造时间，而且成形的零件性能能够达到要求。这种制造一般不需要太高的成形精度，要留有足够的加工余量在后续处理中加工以达到精确的零件尺寸。根据这一要求，激光熔覆快速制造系统不必采用全面的闭环控制方式，但激光器的功率要大，从而保证每层成形高度和扫描速度都可以提高，达到较高的成形速度。

对于第二个方向，制造小型功能梯度复杂零件或多材料复杂零件，则要求有较高的加工精度和灵活的粉末流控制能力，需要完善的闭环控制。另外，要采用多喷头控制或多喷点喷头。相应的 CAD 软件、数据处理软件和控制软件也要能适合这种方向。CAD 设计模型和数据处理中应该能包含材料信息，从而使控制软件根据这些信息控制材料输送。

2　激光选区烧结快速制造技术

本节介绍的激光选区烧结快速制造技术以金属零件的快速制造为主，与第 5 章介绍的原型制造所用材料、工艺、激光器功率等有所区别。

2.1　激光选区烧结快速制造技术的分类

按所使用的材料来分，激光选区烧结快速制造技术主要有三类方法：单一成分金属粉末的烧结、金属粉末与有机黏结剂混合物的烧结、不同熔点的金属粉末混合物的烧结。按制作的零件是否需要后处理，激光选区烧结快速制造技术又可分为两种模式：间接激光选区烧结和直接激光选区烧结。间接激光选区烧结先得到半成品零件，然后经烧结、浸渗等后处理才能达到比较满意的零件性能，该工艺首先由美国 DTM 公司商品化。直接激光选区烧结直接制造出金属零件/模具，不需要经过浸渗等后处理工序，该工艺的主要研究单位是德国 EOS 公司。

2.1.1　按所使用的材料来分

1）单一成分的金属粉末　利用单一成分的金属粉末进行直接烧结，这种方法目前主要用于低熔点金属粉末的烧结，对熔点高的金属粉末，需在保护气氛下采用大功率的激光器。

该工艺的特点是需要大功率的激光器，一般达到 kW 级，成形时需要气体保护，制做的零件强度高，可以直接作为功能件使用。

2）金属粉末与有机黏结剂粉末组成的混合体　利用金属粉末与有机黏结剂粉末组成的混合体进行间接烧结，烧结中，低熔点的黏结剂粉末熔化并将高熔点的金属粉末黏结，形成“绿件”（green part），“绿件”属于多孔结构，强度不高。将“绿件”与另一低熔点的液体金属接触或浸在液体金属内，在毛细力或重力的作用下，液体金属通过成形件内相互连通的孔洞，填满成形件内的所有空隙，使成形件成为密实的金属件。渗金属在可控气氛或真空中进行。在可控气氛中，必须使渗入金属单向流动，这样可让连通孔隙中的空气离开成形件；如多方向渗入，会将成形件中的气体封在体内，形成气孔而削弱强度。如果将成形件置于真空室内渗金属，由于成形件内没有空气存在，可将成形件浸入液态金属中，金属液

体从四周同时渗入，渗入速度快，时间短，通过提高加热温度也可缩短后处理工艺时间。成形件渗入金属后，具有一定使用性能，叫做功能件（function part)。在功能件中，一般含60%的结构材料，其余40%是渗入的金属材料。

该工艺的特点是烧结过程中不需气体保护，激光器的功率小，但需要后处理。常用的“绿件”后处理工艺还有：热等静压（HIP)、液相烧结（LPS）及高温烧结（HTS)，但这三种工艺存在一个共同的缺点，即，零件经过后处理后收缩和变形较大。

美国德克萨斯州立大学最早提出将热等静压方法与SLS工艺相结合，直接生产金属零件。该工艺是通过流体介质（如氩气）将高温和高压同时均等地作用于SLS工艺制作的金属零件表面，消除其内部气孔，提高最终零件的密度和强度，并改善零件的其他性能。要求烧结零件内部的致密度为80%，边界致密度为92%，通过HIP处理后，最终致密度能达到99．9%。图6.12-42是德克萨斯州立大学利用SLS工艺与热等静压相结合而生产的响尾蛇导弹的导向壳体。液相烧结后处理方法是将激光烧结制得的零件坯体再进行高温烧结，使低熔点的金属熔化，产生液相，液相引起物质迁移，填充烧结体内的孔隙，提高零件的密度和其他性能。主要针对的材料为两种金属粉末混合体。

高温烧结是将激光烧结后制成零件坯体，先在400℃下熔烧1 h，使零件中的有机物逐渐分解去除。再对零件进行高温烧结，之后可以进行渗铜等后处理。

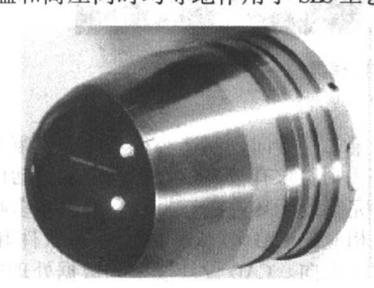
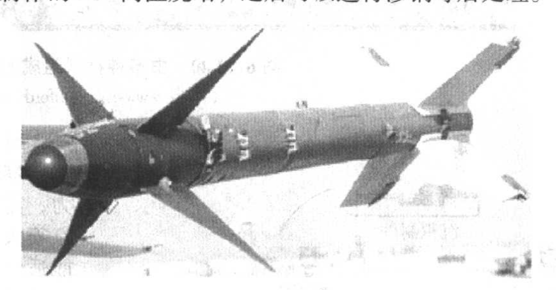



图6.12-42　采用HIP和SLS工艺相结合制造的响尾蛇导弹的导向壳体

3）不同熔点的金属粉末混合物　利用不同熔点的金属粉末组成的混合物进行直接烧结，其中一种粉末具有较低的熔点（如铜粉)，另一种粉末熔点较高（如铁粉)。烧结时激光将粉末升温至两金属熔点之间的某一温度，使低熔点的金属粉末熔化，并在表面张力的作用下填充于未熔化的结构金属粉末颗粒间的孔隙中，从而将结构金属粉末黏结在一起。为了更好地降低孔隙率，黏结金属的颗粒尺寸必须比结构金属的小，这样可以使小颗粒熔化后更好地润湿大颗粒，填充颗粒间的孔隙，提高烧结体的致密度。此外，激光功率对烧结质量也有较大影响。如果激光功率过小，会使黏结金属熔化不充分，导致烧结体的残余孔隙过多；反之，如果功率太高，则又会生成过多的金属液，使烧结体发生变形。因此，最佳的激光功率和颗粒粒径比是获得良好烧结零件的基本条件。

德国EOS公司开发的直接金属激光烧结工艺DMLS（direct metal laser sintering）采用不同熔点的几种金属粉末，通过SLS工艺制作金属零部件，由于各种金属收缩量不一致，故能相互补偿其体积变化，使零件的总收缩量小于0.1%，而且烧结时不需要特殊气体环境。

美国Austin大学的Agarwala等人选用Cu－Sn，Ni－Sn混合粉末，Bourell等人选用Cu－Pb－Sn粉末材料，利用低功率激光快速成形机对混合粉末进行激光烧结直接制作金属模具，用于批量较大的塑料零件和蜡模的生产。新加坡理工大学的Li Lu等人也采用Cu－X（Ni、Fe、W)、Cu－Y（WC、TiC、Ti＋C）和Cu－X－Y混合粉末进行了试验研究，南京航空航天大学也进行了Ni基合金混铜粉烧结成形的试验，制造出了有较大角度的倒锥形状金属零件。

采用不同熔点金属粉末混合物进行烧结的工艺特点是不需要采用大功率的激光器，其中的低熔点金属起有机粘结剂的作用。

2.1.2　按是否需要后处理分

1）直接烧结成形　利用单一成分的金属粉末和不同熔点的金属粉末混合物进行烧结的工艺为直接法。

2）间接烧结成形　利用金属粉末与有机黏结剂粉末组成的混合体进行烧结工艺为间接法。采用该方法烧结得到零件的机械强度和致密度较低，需进行后处理才能满足使用要求。目前，可用于此类方法的成形材料主要有：Fe-Sn、Fe-Cu、Cu-Sn、Ni-Sn、Ni-Cu等。

间接法是目前基于SLS方法进行金属零件快速制造较为成熟的工艺，但是，这种方法制造的金属件在强度、硬度、致密度等方面均无法与直接烧结金属粉末得到的金属零件相媲美。因此，用大功率激光直接烧结成形金属零件是当前快速成形工艺中研究的热点之一。

2.2　激光选区烧结快速制造技术的材料

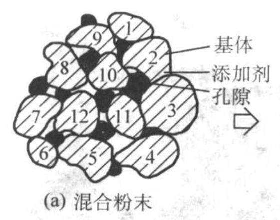
在SLS工艺研究初期，人们一直试图对某种单一成分的金属材料进行烧结，如铜、铅、锡及锌等低熔点金属，但是发现在烧结过程中很容易产生“球化”现象：当输入的能量不太大时，成形易得到由一串圆球组成的扫描线；当输入的能量足够高时，成形易得到半椭圆形连续的烧结线，但激光功率越高，烧结过程中粉末飞溅现象越严重，影响成形尺寸精度。“球化”现象产生的原因主要与粉末熔化后液体质点的受力情况有关。液体质点对固体金属粉末的作用力远比松散的固体金属粉末之间的作用力大，结果导致金属粉末被液体质点粘结形成较大的球体，激光功率越大，球的直径也越大。

为了改善成形质量，减少球化现象的发生，人们将SLS工艺中材料组成的注意力转向了多元系液相烧结。多元系液相烧结基本上有两种：一种是使用具有不同化学性质的粉末混合料，该混合料的液相来自低熔点组元的熔化或者低熔共晶物的形成；另一种是将预合金化的粉末加热到固相线温度和液相线温度之间的温度，进行超固相线温度烧结。目前，比较成熟的多元系液相烧结工艺是前一种，即采用一种金属粉末加黏结剂均匀混合，通过熔化熔点较低的粉末填充烧结体内的孔隙，获得致密的烧结产品。

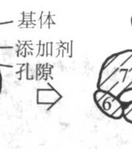
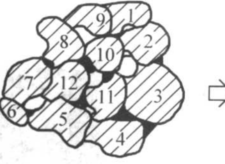
多元系液相烧结方法的动力是液相表面张力和固液界面张力，其烧结过程大致上可划分为三种界限不十分明显的阶段。图6.14-43是这三个阶段的示意图。

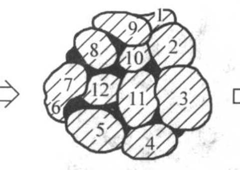
1）第一阶段：液相的生成与颗粒的重新排列阶段　起初，混合粉末被加热到生成液相的温度，随着液相的生成，固相颗粒在液相内近似悬浮状态，受液相表面张力的推动而发生移动，因而液相对固相颗粒润湿和有足够的液相存在是颗粒发生移动的重要前提，并且从而发生快速致密化。颗粒间孔隙中液相所形成的毛细管力以及液相本身的黏性流动，





(a) 混合粉末



(b) 液相形成与颗粒重新排列阶段（液相形成和铺展）


(c) 固相的溶解-沉淀阶段（固相扩散，晶粒长大和形状调整）

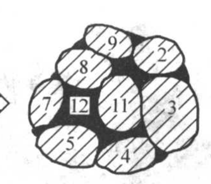

(d) 固相骨架形成阶段（孔隙消除，晶粒长大和接触长大）

图 6.12-43　液相烧结的典型阶段

使颗粒调整位置、重新分布以达到较紧密的排列。

2）第二阶段：固相的溶解－再沉淀阶段　固相在液相中有一定的溶解度和扩散转移是溶解－再沉淀的必要条件。该过程的一般特征是显微组织的粗化，或者称为 Ostwald 熟化。固相在液相中的溶解度随温度和颗粒的形状、大小而变化。小颗粒的溶解度高于大颗粒，因此，小的颗粒优先溶解，颗粒表面的棱角和凸起部分也优先溶解。小的颗粒趋向减小，颗粒的表面趋向平整光滑；相反，溶液中一部分过饱和的原子在大颗粒表面沉析出来，使大颗粒趋于长大。这一过程使颗粒更加靠拢，整个烧结体发生收缩。与第一阶段相比，由于气孔已经基本消除，颗粒间距离更加缩小，使液相流进孔隙更加困难，从而致密化速度减慢。

3）第三阶段：固相骨架的形成阶段　经过前面两个阶段，颗粒之间相互靠拢、接触、黏结并形成连续骨架，剩余液相填充于骨架的间隙。在该阶段，由于固相骨架的存在，固相骨架的刚性阻碍了颗粒进一步地重新排列，因此该阶段的致密化速率明显减慢。此外，大多数液相烧结材料的性能随着该阶段烧结时间的延长而降低，所以在该阶段应使用较短的烧结时间。

经过三个阶段的变化，可获得密度较高、性能较好的烧结产品。

基于多元系液相烧结工艺能解决“球化”现象的原因，原 DTM 公司和 EOS 公司都推出了 SLS 直接制造金属件的金属粉末系。DTM 公司使用的烧结材料主要是聚合物包裹的金属粉末，烧结成的绿件强度低，干燥脱湿后，需要放入高温炉膛内进行烧结、渗铜，最后生成表面密实的零件。EOS 公司研制的烧结材料则是由含有不同熔点不同收缩率的金属化合物组成的金属粉末，它可以直接烧结成致密的零件，不需要后处理，而且不需要功率特别大的激光器。

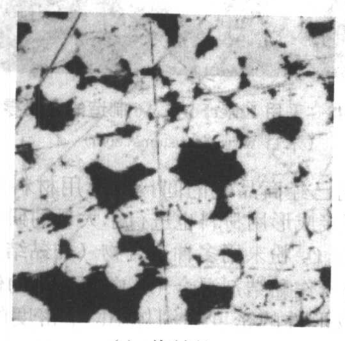
2.2.1　3D Systems（DTM）公司的金属粉末材料

3D Systems（DTM）已经商品化的金属粉末材料主要有三大类：RapidSteel（1.0、2.0）、CopperPolyamide 及 LaserForm（ST－100、ST－200、A6），除了 CopperPolyamide 的基体合金是铜外，其他两大类材料都是以钢粉为基体的，材料的改进主要在合金成分、粉末大小及黏结剂的种类上，从而导致成形件的精度和应用范围有所不同，早期的 RapidSteel 1.0 基体成分是 1080 碳钢，RapidSteel 2.0、LaserForm 系列则主要以不锈钢为主。LaserForm ST－200 的绿件强度比 ST－100 高很多，能成形薄壁件及复杂零件。

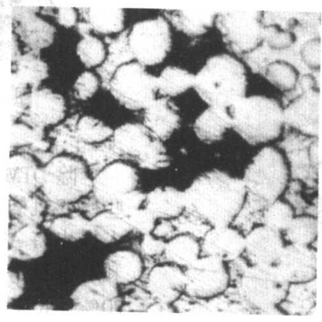
1）RapidSteel 系列　RapidSteel 1.0 所用材料为 1080 碳钢金属粉末＋聚合物材料，平均粒径为 55 μm。聚合物均匀地覆在粉粒的表面，厚度约为 5 μm，其质量分数为 0.8%，体积分数为 5%。烧结参数为：激光功率 30 W，扫描速度 1 550 mm/s，层厚 0.1 mm。成型坯件的密度为 4.3 g/cm^3，是钢密度的 55%，强度可达 28 MPa，收缩率在 4%以内。所渗金属可以是纯铜，也可以是青铜。最终的 RapidSteel 1.0 成形件是由 60%钢和 40% 铜构成，成形件可以进行表面研磨、机械加工，电火花加工、线切割以及表面电镀等处理。这种材料主要用来制造注塑模。

图 6.12-44 是 RapidSteel 1.0 成形件不同阶段的微观形貌照片。图 6.12-45 为采用 RapidSteel 1.0 制造的模芯。

RapidSteel 2.0 是在 RapidSteel 1.0 基础上发展的，将金属



(a) 烧结件


(b) 部分铜浸渗件

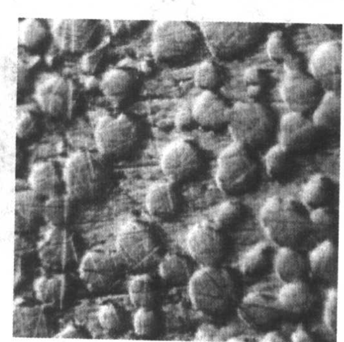

(c) 全部渗铜件

图 6.12-44　RapidSteel1.0 成形件的微观形貌

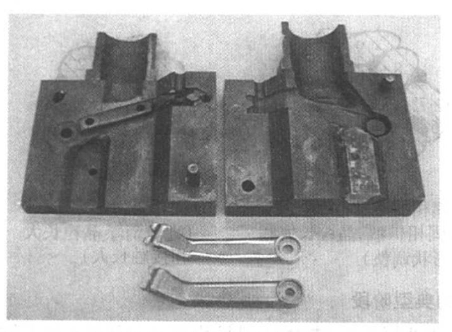
粉末由碳钢变成 316 不锈钢，颗粒尺寸由 55 μm 变成 34 μm，分层厚度进一步缩小，所渗金属由青铜替代铜，黏结剂由热固性树脂黏结剂替代了 RapidSteel 1.0 所使用的热塑性塑料。RapidSteel 2.0 的粉末颗粒小，层厚最小可到 0.075 mm，收缩率低，总收缩率在 0.2% 以下。该材料主要用来制造注塑模，注塑模的寿命已达 10 万件/副，也可以用来制造用于 Al、Mg、Zn 压铸模，压铸模的寿命只有 200～500 件/副。

图 6.12-46 是 RapidSteel 2.0 成形件不同阶段的微观形貌照片。

RapidSteel 2.0 的制造周期比 RapidSteel 1.0 短，制造工件的精度可以达到 ±0.1 mm。

2）LaserForm ST－100 系列　LaserForm ST－100 的平均直径为 23～34 μm，比 RapidSteel 2.0 还小，这有利于成形件的表面处理，同时，也简化了黏结剂的降解和渗金属的工艺，有利于保证精度。该材料既可以用来制作金属原型和零件，又可以用来制造注塑模，制成的注塑模寿命达 1 万件/副以上。LaserForm ST－200 的平均直径为 23 μm。

由于快速模具制造工业与高速数控加工业及 EDM 的竞


(a) 风挡刮水器臂的压铸模芯和压铸件

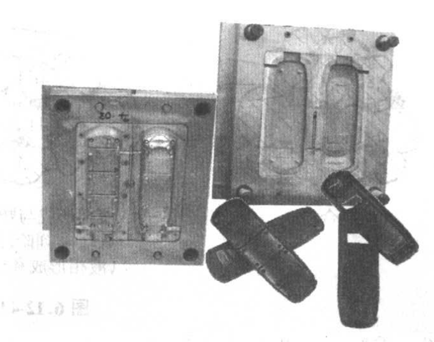
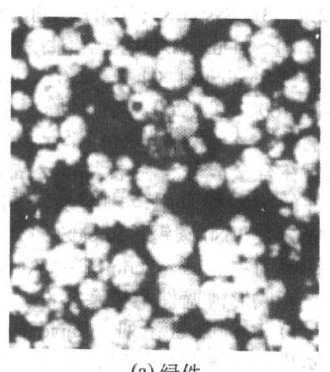

(b) 电子导向仪外壳模芯

图 6.12-45 采用 RapidSteel 1.0 制造的模芯


(a) 绿件

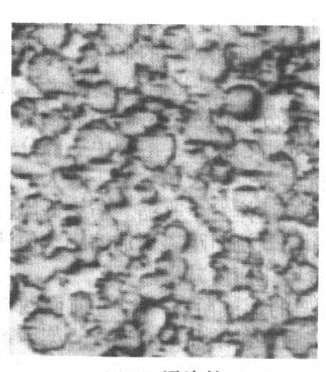
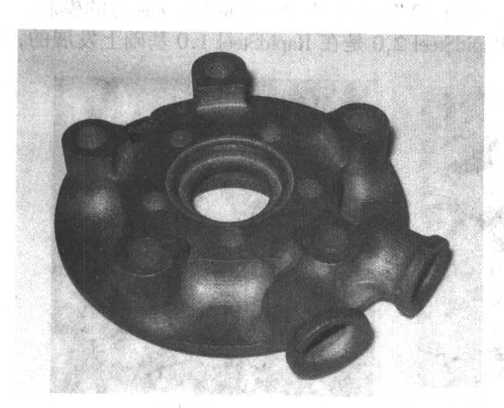

(b) 浸渗件

图 6.12-46 RapidSteel 2.0 成形件的微观形貌

争，特别是在具有高竞争活力的注塑模具制造业中，SLS 工艺烧结出的产品不仅应具有较高的强度、较高的成型和表面精度，而且还应具有较高的成形效率及优良的加工性能（电加工、抛光、打孔、蚀刻、焊接及丝印等）。LaserForm A6 就是 3D Systems 公司为了满足以上要求于 2003 年推出的新一代激光选区烧结成形材料。图 6.12-47、图 6.12-48 为采用该材料制造的零件。


图 6.12-47 采用 LaserForm A6 制造的金属零件
（来自 www.3dsystems.com）

3）CopperPolyamide 基体为铜粉，黏结剂为聚酰胺（Polyamide），其特点是成形后不需要入炉进行二次烧结，制造周期短，可在 1 天内完成模具的制造加工。该材料成形件的后处理工艺为：渗入低黏度、耐高温的高分子材料（如环氧树脂等），固化后用不同粒度的水砂纸进行抛光处理，每抛一层，在表面涂一层密封材料，抛光后表面粗糙度可以降低到 12 μm。制成的模具可广泛用于 PE、PP、PS、ABS、PC/ABS、玻璃增强的 Polypropylene 和其它的常用塑料的注塑成形，但是模具的寿命只有 100 ~ 400 件/副。


图 6.12-48 采用 LaserForm A6 制造的金属零件
（来自 www.3dsystems.com）

除 DTM 公司已经商品化的间接成形用材料外，其他一些研究机构对间接成形用材料也进行了大量的研究工作。有人提出将 Al 和 Al_2O_3 粉末用多种聚合物（如黏结剂、增塑剂和分散剂等成分）作黏结剂混合（其中黏结剂的体积分数为 20% ~ 40%），成形件的密度为固体 Al_2O_3 密度的 40%，用热等静压处理后，密度可提高到固体的 55%；同时发现，在相同条件下，Al_2O_3 试样的强度比 Al 试样的要高 1 倍。

2.2.2 EOS GmbH 公司的金属粉末材料

EOS GmbH 公司开发的材料主要有：EOSINT M Cu3201、DirectSteel 50 – V1、DirectSteel 20 – V1、DirectMetal 50 及 DirectMetal 20。其中，EOSINT M Cu3201 是 Ni、CuSn、及 Cu_3P 的混合物，需要渗树脂，但由于渗透温度不是很高（160℃），烧结成形件的收缩率因此相对很低，可以忽略不计，如图 6.12-49 所示。DirectSteel 系列不需要渗透处理，属于钢基混合物，DirectSteel 50 – V1 的致密度能达到 95%，DirectSteel 20 – V1 的致密度则达 98%。DirectMetal 的基体为铜合金，这是为了满足较高的成形效率而研制的金属粉末材料，DirectMet-



al 20 粉末很细，不需要渗透处理，成形效率比 DirectSteel 高。DirectMetal 50 的烧结件具有多孔表面，制造过程中能自身排气，并能选择性地渗透环氧树脂。

EOS 公司使用的混合金属粉末在烧结过程中可以相互弥补收缩，低熔点金属向基体金属粉末中渗透来增大粉末间隙，产生尺寸膨胀来抵消烧结收缩，使最终的收缩率几乎为零，因而成功地解决了金属粉末凝固收缩的难题，制造出的零件收缩率可以忽略不计，小于 0.1%，且不需要高温后处理。最近，该公司致力于降低粉末的粒度，DirectSteel 20－V1 的铺粉层厚度可以达到 0.02 mm，从而大力提高了烧结件的表面粗糙度，甚至无需另外的打磨加工。

2.2.3　商品化的金属粉末材料性能对比

表 6.12-4 罗列了 3D Systems（DTM）公司和 EOS GmbH 公司已经商品化的主要烧结金属粉末材料的成分、粒径、后处理工艺、主要力学性能、用途及推出时间等技术指标。

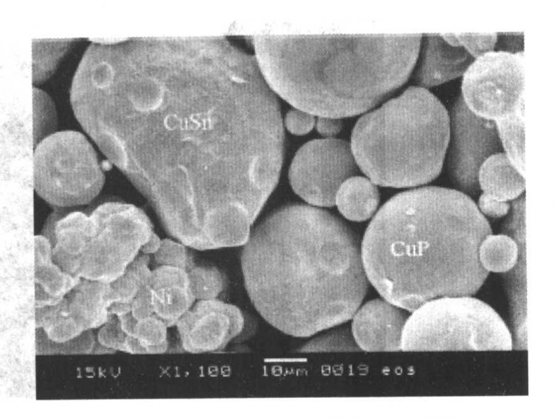


图 6.12-49　M Cu3201 粉末的 SEM 照片

表 6.12-4　DTM 公司和 EOS 公司商品化的金属粉末材料

材料名称	成　分	平均粒径 /μm	浸渗处理	力学性能		用途及使用寿命	推出时间
				抗拉强度/MPa	硬度		
(1) 3D Systems（原 DTM）公司							
Copper Polyamide	铜/聚酰胺复合粉	—	不需要	35.9	75HRD	注塑模 100～400 件/副	—
RapidSteel 1.0	覆膜碳钢粉（碳钢＋铜）	55	渗纯铜	475	75HRB	注塑模	1996
RapidSteel 2.0	覆膜钢粉（316L 不锈钢＋青铜）	40～50	渗青铜	580	22HRC	注塑模 10 万件/副 金属模上百件/副	1998
LaserForm ST－100	覆膜不锈钢粉	23～34	渗青铜	510	87HRB	注塑模、金属件	2000
LaserForm ST－200	覆膜 420 不锈钢粉	23	渗青铜	435	HRB79	金属件、注塑模 压铸模	2002
LaserForm A6	覆膜钢粉	—	—	610	HRC20①	注塑模、复杂零件	2003
(2) EOS 公司							
EOSINTM Cu3201	Ni、CuSn、Cu_3P 混合物	30	渗树脂	120	HB43-84	注塑模 1 000 件/副	1997
DirectSteel 50-V1	钢粉（混有青铜及镍粉）	50②	不需要	500	HB180-220	功能件、压铸模 注塑模 10 万件/副	1999
DirectSteel 20-V1	钢粉（混有青铜及镍粉）	20	不需要	600	HB150-250	功能件、注塑模、压铸模上千件/副	2001
DirectMetal 50	青铜粉	50	渗树脂	200	HB90-120	金属原型、注塑模	—
DirectMetal 20	青铜粉	20	不需要	400	—	金属原型、注塑模	2001

① 采用 LaserForm A6 粉末成形的零件热处理后硬度能达到 HRC39；
② Directsteel 和 DirectMetal 系列的数据为颗粒的最大尺寸。

EOS 公司金属粉末烧结快速成形制造件的主要力学性能如表 6.12-5 所示，DM 指 DirectMetal，DS 指 DirectSteel。

表 6.12-5　金属粉末烧结件力学性能表

性　　能	DM 50	DM 20	DS 50	DS 20
可实现零件精度/μm	±80	±50	±100	±50
最小壁厚/mm	0.7	0.6	0.9	0.7
最小收缩率/%	20	8	5	2
抗拉强度/MPa	200	400	500	600
硬度 HB	90	110	200	220
未进行后处理的表面粗糙度 /μm	R_a14 R_z 50～60	R_a 9 R_z 40～50	R_a 18 R_z 60	R_a 10 R_z 50
进行后处理的表面粗糙度 /μm	R_a 5 R_z 20	R_a 3 R_z 15	R_a 7 R_z 35	R_a 4 R_z 15
线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	25	18	18	9
热导率(25℃)/W·$(m·K)^{-1}$	15	25	25	13
最高承受温度/℃	400	400	800	800

2.3　激光选区烧结快速制造技术的应用

2.3.1　金属零件直接制造

德国 EOS 公司在金属粉末的激光选区烧结快速制造方面一直走在前列，它开发了激光烧结直接制作金属零件和模具的技术 DMLS（direct metal laser sintering）和 EOSINT M 系列设备。EOS 公司最新推出的 M270 机型中，激光器由原来的 CO_2 激光器换成了固体 Yb 光纤激光器，尽管功率仍维持在 200 W 不变，但最小光斑仅为 100 μm，因此功率密度得到大幅提高，可支持更高的扫描速度，减少了激光对零件的热影响和成形过程中的变形。同时，Yb 激光的波长更易于金属的吸收，在激光作用下金属粉末可充分熔化，最终成形零件的密度几乎可达到 100%，制作件的精度和分辨率也相当高，这是传统的 SLS 方法难以达到的。图 6.12-50 为采用 EOS 激光粉末烧结快速成形系统制造的金属零件。

2.3.2　模具制作

EOS 还推出了用于金属成形的粉末材料 DriectSteel H20，其硬度可达 42HRC，拉伸强度达 1 200 MPa。用 DriectSteel H20 材料制作的模具镶块用于塑料注射模，其寿命可达 10

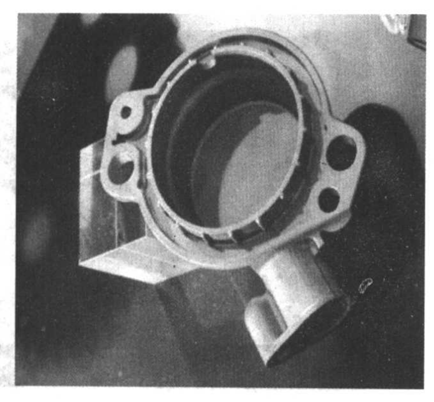
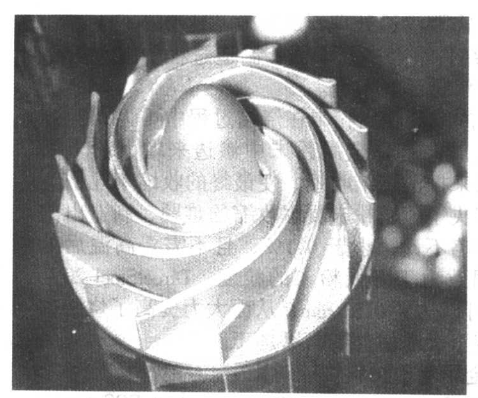



图 6.12-50　EOS 激光粉末烧结快速成形系统制造的金属零件
（来自 www.eos _ gmbh.de）

万件，如图 6.12-51 所示。图 6.12-52 为采用 EOSINT M250 XTEND 快速成形系统制造的金属模具及零件。

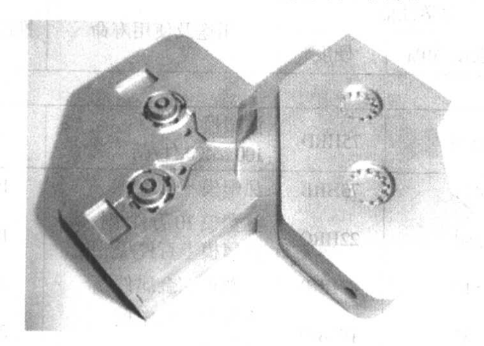


图 6.12-51　DMLS 制造的模具镶件（材料为 DriectSteel H20）
（来自 www.eos _ gmbh.de）

DTM 公司于 1994 年推出 Rapid Steel 制造技术，在 SLS 中烧结表面包覆树脂材料的铁粉，初次成形零件后，置入铜粉中再一起放入高温炉进行二次烧结制造出注塑模具，此模具在性能上相当于 7075 铝合金，可以注塑 5 万件。图 6.12-53 为美国 NACCO 公司利用 DTM 设备生产的手柄注塑模，材料为 RapidSteel® 1.0。该手柄每年需求量为 3 000 到 5 000 件，属于小批量生产，工件的壁厚尺寸变化比较大，从 2.5 mm 到 13 mm 不等，形状复杂，交货日期短，传统的方法生产周期长，费用高。采用 DTM 的 SLS 工艺后，不仅生产的速度很快，而且可以直接将随形冷却通道加到设计文件中。

2.4.3　研究单位

除了 EOS 和 3D systems 公司以外，还有很多单位在激光选区烧结快速制造方面进行研究工作和市场开发，如德国 Concept Laser 公司开发了用于金属零件快速成形的设备 M3 Linear。M3 设备的特点是一个激光器三种功能：零件成形、零件三维刻蚀及激光打标，是一台多功能设备。M3 采用半导体泵浦的单模 Nd:YAG 激光器，激光功率 100 ~ 200 W，具有良好的光束质量、功率稳定性和长的使用寿命（10 000 h）。在扫描技术上，M3 采用了精密可移动性扫描头，将 250 × 250 mm 的成形范围划成 4 个 125 × 125 mm 的小视场，这样可根据零件的尺寸，选择不同的视场范围，每个视场中心点的线性误差 < 15 μm。由于单个视场范围小，因而可获得更小的光斑，从而提高零件的精度和分辨率。在成形材料方面，Concept Laser 有不锈钢、工具钢和钛合金，从技术指标看，其工具钢材料 CL51WS 成形后的硬度可达 HRC 54，抗拉强度为 1 500 MPa，热处理后可达 1 800 MPa。

此外还有法国 Phenix systems 公司和新加坡国立大学等单

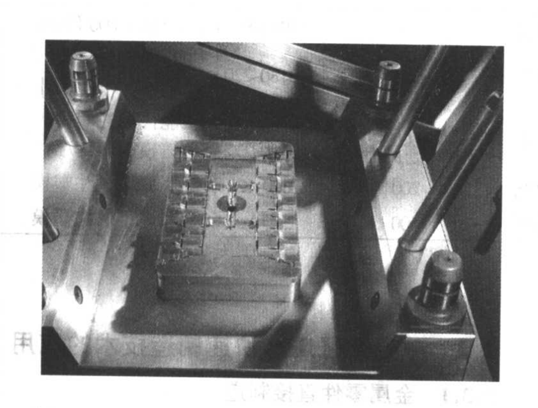
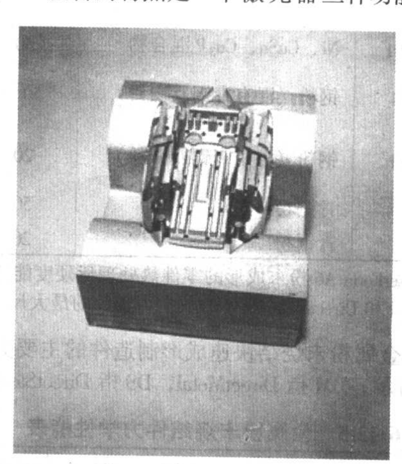



图 6.12-52　采用 EOSINT M250 XTEND 快速成形系统制造的金属模具及零件
（来自 www.eos _ gmbh.de）

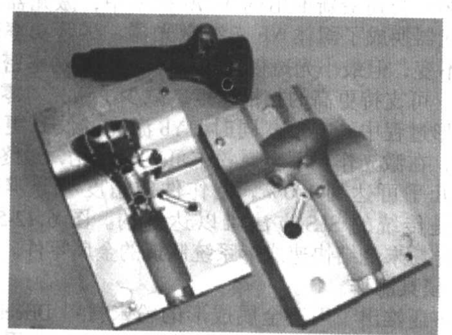


图 6.12-53　SLS 工艺制造的手柄注塑模



位在从事相关研究及设备开发。

2.4　激光选区烧结快速制造技术的研究内容与发展方向

2.4.1　研究内容

选区激光烧结技术在进行金属零件快速制造的研究内容，主要体现在以下五个方面。

1）成形零件形状误差　快速成形技术是利用分层制造思想，将三维零件的制造问题转化为二维面片的制作。由于STL文件是用小三角形平面组合近似三维模型，它和水平面求交得到的轮廓存在误差。三角形尺寸越大，轮廓尺寸误差越大。二维面片的厚度使成形零件产生台阶效应，面片越厚，台阶效应越明显。由于存在成形原理误差，它直接影响零件的形状误差和尺寸精度。

2）成形零件工艺缺陷　零件在成形过程中，由于受材料、工艺等因素影响，烧结件会产生各种冶金缺陷（如裂纹、变形、气孔、组织不均匀等），因此研究粉末材料的物理特性，如粉末粒度、密度、热膨胀系数以及流动性等对零件中缺陷形成的影响具有十分重要的意义。粉末粒度和密度不仅影响零件中缺陷的形成，而且显著地影响着零件的精度。烧结工艺参数，如激光功率、扫描速度、扫描方向、扫描间隔以及层厚等对层与层之间的连接，烧结体的收缩变形、翘曲变形甚至开裂都会产生影响。

3）成形机理　由于各种金属材料的化学成分、物理性质不同，因而激光与粉末相互作用的成形机理也各具特征。在快速制造中，金属粉末的合金成分、激光照射区固液界面的温度梯度、固液界面能、固相生长情况以及烧结金属粉末的凝固过程和致密化的机理、烧结工艺参数等许多因素都影响着成形金属材料或零件的显微组织，因此要加强研究各种金属材料在成形过程中的行为和组织结构变化，使控制和调整成形材料或零件的性能成为可能。

4）金属粉末烧结成形数据缺乏　目前人们对粉末在松散状态下激光烧结温度场研究的还不够，用现有的热传导理论分析得到的结果与实际情况相差较大，急需要建立一种新的数学模型对激光烧结金属粉末进行分析，得到比较符合实际的结果。在此基础上，对现有各种金属材料进行烧结试验研究，搞清影响烧结成形、烧结件质量的材料和工艺参数，从而找到各种材料烧结成形的最佳工艺参数，建立起激光快速制造的材料工艺数据库，显得尤为必要。

5）材料制约问题　目前应用于激光选区烧结快速制造技术的材料只是少数商品化材料，并且对这些现有的商品化材料的快速成形研究也只是零星的工作，还没有较多的科学数据。

激光选区烧结技术中所采用的金属材料要做多方面的改进。可以采用极细的金属粉末，如在粉末中掺入一定量的纳米粉末进行SLS实验，这些均有待于进一步的研究。

2.4.2　发展方向

激光选区烧结直接成形金属零件技术的历史很短，其应用仅仅处于起步阶段。目前，限制该项技术大规模推广的主要因素是：设备价格昂贵，一般高于40万欧元，1 kg成形材料要几十欧元；零件的粗糙度较大，一般 $R_a > 10\ \mu m$，经喷丸处理可达 $5\ \mu m$；可用于成形的材料种类很少，难于满足各种工况需要；激光烧结成形面积较小。尽管目前还存在这些不足，但激光选区烧结直接成形金属零件技术不受几何形状的限制、工艺过程简单、制造周期短及人力成本低等特点使其在未来的市场竞争中具有很好的成长空间。

展望未来，激光选区烧结金属材料领域中的研究方向应该是：

1）单元系金属粉末的烧结/熔化成形；

2）多元合金材料的烧结成形；

3）先进金属材料如金属纳米材料、非晶态金属合金等的激光烧结成形等。

4）具有功能梯度和结构梯度的零件直接烧结成形。

3　激光选区熔化快速制造技术

以德国F&S/MCP及英国The University of Liverpool为代表的金属粉末激光选区熔化技术SLM（selective laser melting）采用单一成分的金属粉末，其主要特点是金属粉末在激光辐照下，达到完全熔化，而非局部熔结。由于熔化部分不存在固相成分，表面张力很容易导致所谓“球化”现象，通过对材料成分和技术参数的严格控制，可以使之消除。与烧结相比，选区熔化能使制件达到或接近完全致密的程度，而且采用单一成分的金属粉末进行选区熔化还可以保证材料成分的稳定性。只要克服“球化”现象，SLM技术比SLS技术应该更具市场前景。图6.12-54为SLM技术的原理示意图，图6.12-55为采用SLM技术制造的具有内流道的模具。

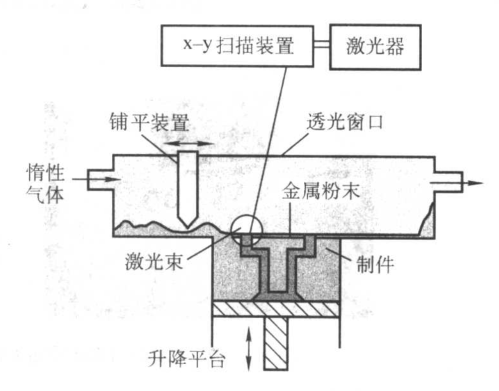


图6.12-54　SLM技术示意图

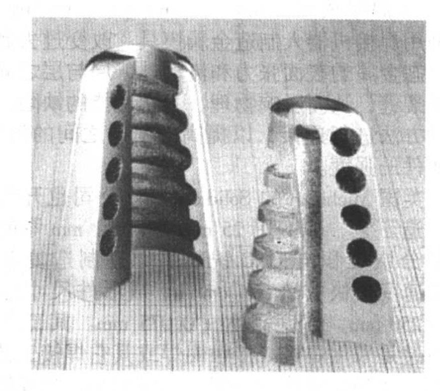


图6.12-55　采用SLM技术制造的具有内流道的模具

4　金属板材叠加制造技术

金属板材叠加制造技术是基于LOM工艺方法，直接采用金属片材，通过激光切割、焊接或粘接金属片材制造金属零件及模具。

日本Tokyo Institute of Technology大学的T.Obikawa等人使用0.2 mm厚、两面涂了低熔点合金的钢板，通过焊接堆积制造金属模具。此外，还有人采用2.5 mm厚、两面涂了低熔点的材料的铝合金板，层层叠加成形。这两种方法最后都需要机加工处理，以保证表面质量。

CAM-LEM INC.公司开发的叠层工程材料计算机辅助制造技术CAM-LEM（computer-aided manufacturing of laminated Eng. materials）首先采用激光在板材上切割出轮廓，然后采用黏结剂黏结这些金属薄膜，并在炉子中进行烧结，去除黏结剂并使各层粘接在一起得到金属零件。该金属零件的密

度能达到理论值的99%，但同时会引起较大幅度的收缩（12%～18%），需要在CAD建模时加以考虑。图6.12-56为CAM－LEM工艺的制作过程，图6.12-57为该公司开发的CAM－LEM制造设备CL－100及制造的金属模具。

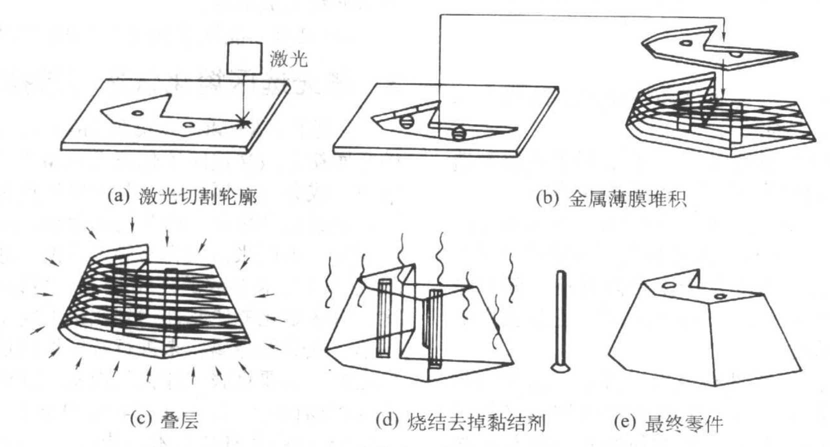


图6.12-56　CAM－LEM技术示意图（来自www.camlem.com）



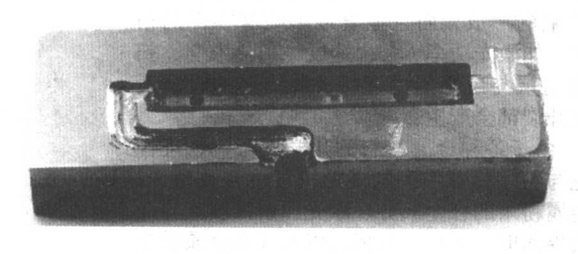


图6.12-57　CAM－LEM设备CL－100及制造的金属模具（来自www.camlem.com）

英国Nottingham大学的Phil Dickens和J.D.Spencer提出了一种基于三维焊接成形（three－dimensional welding shaping）的方法，利用焊接机器人制造金属模具。改变过去制造金属件时，因液态金属的表面张力和流动性，层与层之间连接不牢固会出现裂缝，从而影响物理、力学性能的缺陷，提出用凹凸结合的方法进行连接，以提高层与层之间的粘接强度，可提高金属件的强度。

此外，美国Michigan的Solidica，Inc公司也开发了一种直接金属制造工艺，他们用25 mm宽，0.1 mm厚的铝合金带材，根据分层堆积与CNC铣削的原理制造复杂的铝件（模），制造速度很快可达574 cm^3/h，成形件尺寸为500 mm×900 mm×250 mm，精度高达±0.075 mm。其工艺与LOM类似，只不过是采用焊接（接触辊焊或其它焊接工艺）方法将铝带堆积层面分别焊接在一起，然后用高速数控铣去铣轮廓和切割分开成形件。

国内重庆大学采用真空压力热扩散焊也进行了基于LOM工艺的金属板材叠加成形方面的研究。

5　生坯带激光烧结技术GTLS

生坯带激光烧结技术GTLS（green tape laser sintering）是日本Ibaraki大学前川克广教授（Katsuhiro Maekawa）发明的一种将SLS技术与叠层实体制造技术LOM（laminated object manufacturing）相结合的一种快速成形技术。金属粉末和有机黏结溶剂混合制成悬浮液，制成适合于LOM工艺的生坯带。然后，采用150W的Nd:YAG激光器辐照带材使之选区烧结，在必要的地方铺上粉末材料，压实后再进行二次烧结。逐层反复烧结，最后除去未烧结材料，则可获得三维金属型。

这种工艺的实质是SLS＋LOM，采用的粉末材料有ODHC铜，SUS316L不锈钢、纯Ti粉以及WC－Co合金。它既克服了LOM工艺的材料局限性，又克服了层间粘接强度低等缺点，且生产效率比SLS工艺有极大的提高。

以ODHC铜为例说明其具体的加工参数：材料是99.99%纯度的ODHC铜，粒度40 μm，带厚200 μm，带密度5.3 g/cm^3。Nd:YAG激光器的波长0.06 μm，功率35 W，束斑直径0.25 mm，扫描速度200 mm/min，扫描间距0.20 mm。前川克广教授还提出将这个技术用于分层集成电路的制造。

图6.12-58为GTLS技术的生坯带制作工艺示意图。

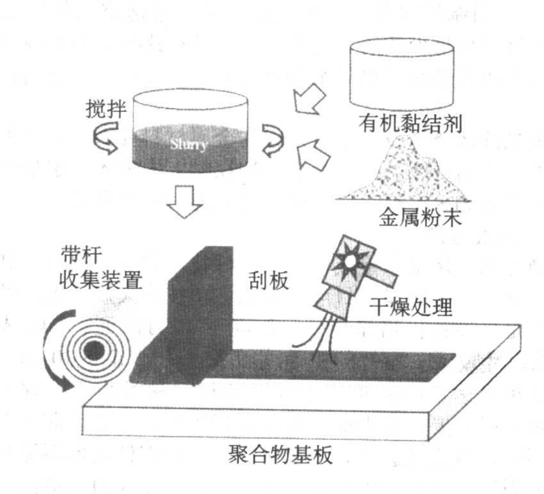


图6.12-58　GTLS生坯带制作工艺示意图

编写：齐海波（清华大学）



第 13 章　电子束快速制造技术

电子束与激光同属高能束，二者存在很多相似点。激光在快速原型及快速制造领域得到了广泛的应用，而电子束应用的较少，本章通过简要回顾电子束的发展历程，对比激光和电子束的优缺点，并介绍目前几种利用电子束进行快速制造的技术，以期引起广泛的关注和研究。

1　电子束技术

1.1　电子束技术发展及应用概况

电子束的发现，至今已有 100 多年的历史，“阴极射线”(cathode－ray) 的名称出现甚至还在人们了解电子的性能之前。1879 年，Sir William Crookes 发现了在阴极射线管中的铂阳极被阴极射线轰击而熔化的现象。1897 年，J.J.Thompson 的研究工作证明，所谓的阴极射线实际上就是电子束。到了上个世纪初的 1907 年，Marcello Von Pirani 进一步发现了电子束作为高能量密度热源的可能性，他第一次用电子束做了熔化金属的试验，成功地熔炼了钽。

高速度的带电粒子携带大量能量早已为人们所知，但以高能带电粒子束作为加工的工具还是近 50 年的事。1948 年，前西德的 K.H.Steigerwald 博士在 0.5 mm 厚的不锈钢板上打出了直径 $\phi0.2$ mm 的孔，标志着电子束开始了在材料加工方面的应用。1957 年，法国用电子束焊机焊接原子能反应堆燃料元件锆包套封口并取得成功。这些成果迅速引起了各国科技界对强流电子束作为加工手段的潜在能力的高度重视，继而竞相开展电子束加工技术的研究，并在上世纪 60 年代中期将电子束焊接技术大量用于航空、航天及电子工业中，对材料表面强化处理方面的研究与应用也开始于上世纪 70 年代初期。

高能量密度大功率电子束加工时将电子束的动能在材料表面转换成热能，其能量密度可高达 10^7 W/mm^2，功率大小可达到上百 kW。由于能量与能量密度都非常高，电子束足以使任何材料迅速熔化或汽化。因此，电子束不仅可以加工钨、钼、钽等难熔金属及其合金，还可对陶瓷、石英等材料进行加工。此外，电子束的高能量密度使得它在生产过程中的加工效率也非常高。

国内从上世纪 60 年代初开始研究电子束焊接，随后开发了电子束熔炼，到 80 年代，电子束热处理的研究与开发也迅速发展。

1.2　电子束技术原理

1.2.1　电子束的形成

为了更好地理解电子束在加工技术方面的应用，还是简要地回顾一下电子束的形成。

电子束表示的是在空间占据一定长度，其中的带电粒子运动轨迹都近于平行的一群带电粒子，要产生这样的一群带电粒子必须有一个形成系统。带电粒子形成束后在空间中运动如果想维持不散开，还需要聚焦装置，这是由于带电粒子自身的空间电荷力相互排斥的原因所致。当电子束空间电荷密度不高时，空间电荷力对带电粒子的运动将没有重大影响，可以不加考虑，这种电子束称为弱流电子束；当空间电荷密度很高时，带电粒子之间的排斥力将严重影响到它们的运动状态，此时必须考虑由于排斥引起的发散，这种电子束称为强流电子束。

为了产生所需截面形状的电子束（圆形、矩形等）必须用电场和磁场，电场用电极产生，磁场则用线圈或永久磁铁产生，这些电极和磁铁或线圈统称为电子束的形成系统，示意图见图 6.13-1，典型的形成系统可分为四个区。

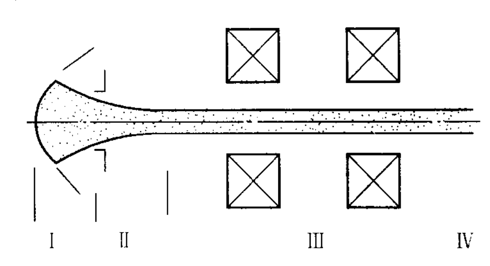


图 6.13-1　电子束形成系统示意图

Ⅰ电子束形成区　由带电粒子发射源、使带电粒子聚束的聚束极及使带电粒子加速的阳极组成。这些电极产生的场与带电粒子本身的空间电荷形成的场使带电粒子成束，并具有高能量，以高速度飞出。

Ⅱ过渡区　各个电极产生的静电场基本消失了，带电粒子的空间电荷场继续存在，构成的空间电荷将使电子束散开；但是，在形成区获得的速度又使带电粒子依惯性向中心轴会聚，这两种作用共同作用的结果使得带电粒子形成平行束、会聚束或发散束。

Ⅲ漂移区　带电粒子仍在无外加场的空间中沿纵向飞行，不再受外加电磁场力的影响，但带电粒子的空间电荷力仍试图使电子束散开，因此装置聚焦磁场来抵消使电子束散开的空间电荷力。漂移区一般不太长。

Ⅳ加工区　电子束打在工件上将动能转换成热能，完成焊接、打孔、熔炼或进行注入、刻蚀、溅射等加工，工件将吸收带电粒子携带能量的 90% 以上。

电子束的截面形状一般为圆形，为了某些特殊用途也可以作成矩形或其它形状。

1.2.2　电子束加工技术

电子束加工技术是利用高能量密度的电子束对材料进行工艺处理的一切方法的统称，包括电子束焊接、打孔、表面处理、熔炼、镀膜、物理气相沉积、雕刻、铣切、切割以及电子束曝光等。其中，电子束焊接、打孔、物理气相沉积以及电子束表面处理等在工业上的应用最为广泛，也最具竞争力。

在真空条件下，利用聚焦后能量密度极高（10^7 W/mm^2）的电子束，以极高的速度（光速的 1/2～1/3）冲击到工件表面极小的面积上，在极短的时间（几分之一微秒）内，电子束能量的大部分转变为热能，工件被冲击部分瞬时达到几千摄氏度以上的高温，由于热量来不及传导扩散，材料局部发生熔化和汽化。通过控制电子束能量密度的大小和能量注入时间，可以达到不同的加工目的。例如，使材料局部加热可进行电子束热处理；使材料局部熔化可进行电子束焊接；提高电子束能量密度，使材料熔化和汽化，可进行打孔、切割等加工；利用较低能量密度的电子束轰击高分子材料产生化学变化的原理，可进行电子束光刻加工等。

1.3　电子束加工的物理基础

1.3.1　电子束和固体的相互作用

高能电子在加速场的作用下与固体表面产生碰撞时，入射电子中的部分电子和固体最表面的原子作弹性碰撞时，不

损失能量就被反射回来；部分入射电子和固体中的原子作一、二次非弹性碰撞后，只损失了部分能量，然后被反射回来；而大部分的电子和固体碰撞后打入固体内部与固体内部原子作弹性、非弹性的多次碰撞，作杂乱运动，直到电子失去全部能量而终于停止运动。

一次电子轰击固体时，有相当大的能量，入射到固体内部后与内部的原子作多次杂乱的碰撞，称之为重复级联碰撞。入射的一次电子约在 10^{-10}s 内寿命就终止了。但在运动的轨迹周围，碰撞的结果产生了很多二次电子和剩余离子。物质内部的电子，从一次电子处获得了高能量后脱离原子核的束缚，部分会向固体表面扩散。在运动过程中由于还会与晶格原子不断地发生碰撞，不断损失能量，到达表面时只有具有的能量比表面势垒高 2~6 eV 的电子才能从固体表面逸出，形成二次电子发射。另外，被激发的原子恢复到原来正常状态时，随着状态的变化还会有荧光、X 射线、俄歇电子等发射出来。

入射电子与金属靶材碰撞所损失的能量大部分转换成热能，用来进行焊接、熔炼、蒸发及微细加工。

1.3.2 能量转换

如果电子的加速电压为 V_a，电子在电子枪的静电场中被加速所获得的动能 $E = eV_a$，通常在电子束加工中使用的加速电压范围为 10~150 kV。

在电子束加工装置中，表示特性的主要参量有束功率 P_0、单位面积上的功率（即在作用点上的功率密度）p_0、加速电压 V_a 和束直径 d_0。

如果知道加速电压 V_a 和束电流 I_a，束功率 P_0 则为

$$P_0 = V_a I_a \tag{6.13-1}$$

作用点上的束功率密度 P_0 为

$$P_0 = \frac{V_a I_a}{S} = \frac{4V_a I_a}{\pi d_0^2} = V_a j_a \tag{6.13-2}$$

式中，j_a 为电流密度。

另外一个重要的特性是轰击部位单位体积吸收的功率 P_A，在整个电子有效射程（L）上单位体积吸收功率的平均值

$$P_A = \frac{P_0}{V} = \frac{V_a I_a}{\frac{\pi d^2}{4} L} = \frac{V_a j_a}{L} \tag{6.13-3}$$

电子的有效射程 L 由近似关系式（6.13-4）表示，L 的单位是 cm。

$$L \approx 2.1 \times 10^{-12} \frac{V_a^2}{\rho} \tag{6.13-4}$$

式中，ρ 为物质的密度，g/cm³；V_a 的单位为伏特，V。

电子的有效射程度与被轰击材料的密度成反比，与电子加速电压的平方成正比，但一般都很薄，约为数十或数百微米。

将式（6.13-3）与式（6.13-4）联立得

$$p_A \propto \frac{j_a}{V_a} \tag{6.13-5}$$

由此可见，单位体积吸收的功率仅随工件上的电流密度的增加而增加，而不会由于加速电压增高而增加。在整个电子束射程内能量吸收的分布是不均匀的，即单位体积中吸收的功率是电子束进入物质深度的函数。这个关系可由曲线图6.13-2表示。吸收功率在射程的 1/3 处达到最大值，在余下的射程中曲线单调的降为零。

1.3.3 热的产生与传输

热的产生：当功率密度很大的高速电子和固体碰撞时，由于电子和原子核之间的质量差别极大，电子与原子核的碰撞可以看作弹性碰撞，所以能量的损耗主要是通过入射电子

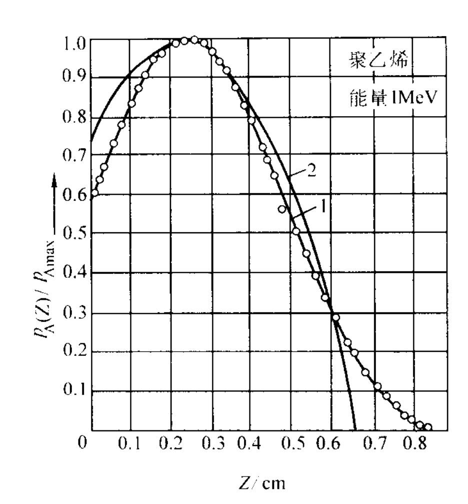


图 6.13-2 单位体积吸收的功率 p_A（z）与最大值 p_{Amax} 的比值对距离 z 的关系

1—测量值；2—计算值

与靶材表层的电子碰撞实现的，传递给靶材表层电子的能量立即以热能的形式传给靶材表层的点阵原子。由于电子束轰击靶材表层时间极短，加热过程中热量来不及扩散，可以近似地认为是准绝热的，其热传导效应可以忽略，靶材表层内温度分布曲线和入射电子在其内的深度分布曲线相似。

以上讨论的是电子束垂直靶材表面入射的情况，如果入射角度改变，能量沉积情况随即变化。模拟计算表明，随着入射角度从90°开始降低，能量沉积峰值位置也向表面移动。当入射角为30°时，能量沉积峰值点已到达金属表面。

热的传递：电子束沉积的能量在瞬间就转变成热能。由此造成的温度分布曲线与能量沉积分布状态相似，产生的温度梯度很大。升温速率和实际到达的温度，取决于电子束的束流强度、带电粒子的质量和能量、轰击时间，此外还有靶材自身的物理性质和散热条件。当束流强度很高时，靶材表面在电子轰击下立即升温，大约在不到一个微秒的时间内开始熔化，熔化的开始点在能量损耗最大的部位，随后向表面扩展。一般情况下熔化层只有几个微米。如果电子束持续轰击，则靶材的熔化区域就向深部发展。

热流的状态可利用普通的热扩散方程求解，可把热源看作在局部表面上的一点状热源，作半无限区域的热传输来考虑。

轰击结束后，靶材将迅速冷却或凝固，冷却过程取决于熔化层的厚度和靶材的热性能（热导率、熔解热等），还与靶材的冷却状况有关，冷却速率也可以非常高。

1.4 电子束加工设备

电子束加工设备主要包括电子枪系统、真空系统、控制系统和电源系统，其装置示意图如图6.13-3所示。

1）电子枪系统　电子枪由阴极3、聚束极2和阳极1组成，阴极发射的电子射出阳极孔后进入聚焦线圈5和偏转线圈6组成的磁场区域，在磁场区域内电子束将聚焦成所需的尺寸并将电子束斑偏转到所需要的位置上。

2）真空系统　包括电子枪排气系统8和工作室排气系统9两部分。其中，在电子枪部分，为了延长产生热电子的灯丝使用寿命，必须有较高的真空度，一般达 10^{-2} Pa 以上；工作室的真空度依焊接工件材料而定，一般有 1 Pa 左右就可以了。

3）控制系统　包括高压电源控制、电子枪阴极加热电源控制、束流控制、聚焦电源控制、偏转电源控制、工作台

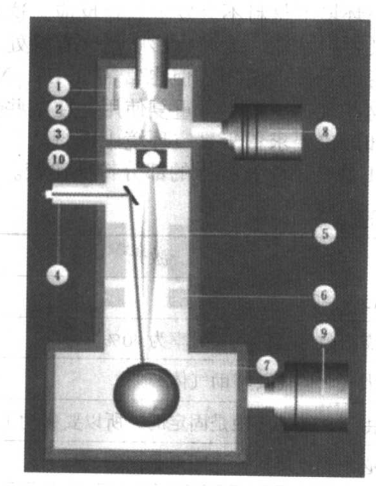


图 6.13-3 电子束装置示意图（桂林狮达公司提供）
1—阳极；2—聚束极；3—阴极；4—光学观察系统；
5—聚焦线圈；6—偏转线圈；7—工件；
8—电子枪室真空系统；9—工作室真空系统；10—隔离阀

移动控制、真空系统控制及监测装置控制等。

4）电源系统　包括高压电源、阴极加热电源、束流控制电源、聚焦电源、偏转电源和真空系统的扩散泵加热电源等。

1.5 电子束加工设备分类

电子束加工设备大体上可以按三种方法分类：根据工作室的真空度高低来分；根据电子枪加速电压的高低来分；根据电子枪固定方式来分。

（1）按工作室的真空度来分

1）高真空　工作室的真空度在 1.33×10^{-2} ~ 1.33×10^{-4} Pa之间，电子束在高真空度的工作室运动具有电子束散射小、聚焦容易、功率密度大及最大工作距离大等优点。

2）低真空　工作室的真空度在 13.3 ~ 1.33 Pa 之间，电子枪仍在高真空度下工作。在电子枪室与工作室之间有一特殊设计的气阻，它可让电子束通过进入工作室，但能限制气体从工作室流入电子枪室的量，以保持电子枪室的高真空度。低真空工作室的主要特点是工作室抽真空时间比高真空的短，生产效率较高，但电子束有一定散射。

3）非真空　电子束从电子枪发射出来后直接通过引出口进入大气。其特点是结构简单、设备成本低，但电子束进入大气后会与气体分子发生碰撞产生散射，因而工作距离较短，以 10 mm 左右为宜。

（2）按电子枪加速电压的高低来分

1）高压型　加速电压在 60 ~ 175 kV 之间；

2）中压型　加速电压在 40 ~ 60 kV 之间；

3）低压型　加速电压低于 40 kV。

其中应特别指出的是，高压型电子束设备的加速电压高，这有利于电子束直径聚细，从而提高电子束的功率密度，但是，高压型电子束设备产生的 X 射线强度随加速电压的增加而增加，所以工作室必须加强屏蔽。

（3）按电子枪固定方式来分

1）动枪式　即电子枪在工作室上面或工作室内可以移动或转动，这种电子枪的加速电压一般低于 60 kV。

2）定枪式　电子枪固定在工作室上面，不能移动位置，结构比动枪式简单，加速电压一般属于高压型，故对绝缘性要求较高。

2 电子束与快速制造技术

2.1 电子束与激光特征比较

在快速原型和快速制造技术发展过程中，激光发挥了巨大的作用。快速原型中的 LOM、SLA 及 SLS 都是以激光为基础发展起来的，快速原型技术也为激光开拓了应用范围。但当快速原型技术向快速制造技术发展时，特别是在金属零件直接制造过程中，激光存在着许多不足的方面表现出来了，如：能量转化率低，CO_2 激光器的电光转换率在 20% 左右，YAG 激光器的电光转换率只有 2% ~ 3%；光能的吸收与波长、被照材料的反射率以及能量密度相关；高功率激光器价格昂贵，运行费用高；高功率时，激光的光路系统吸热严重，需要水冷，造成扫描的机构复杂。这些都使得基于激光的金属零件快速成形工艺的系统复杂，工艺要求高，价格昂贵，运行费用较高。

电子束与激光同属高能量密度热源，其能量密度在同一段数量级，远高于其他热源。与一般加工方法相比，它们的共同特点是：加工无机械变形，加工速度快，热影响区小，束斑直径小，加工精度高，加工参数能精确控制等。但电子束与激光的工作原理不同，电子束的加热方式是高能电子穿过靶材的表面进入到距表面一定深度后再传给靶材原子能量，从而使靶材原子的振动加剧，把电子的动能转换为热能；激光则为靶材表面吸收光子能量，激光并未穿过靶材表面。正是由于电子束和激光的这一区别，使得各自的加工过程有所不同：激光加工时表面温度最高，电子束加工时则在距表面一定深度处温度最高。此外，电子束与激光相比还存在以下一些优点。

1）能量利用率高　电子枪的能量转换效率一般为 75% 以上，比激光的要高许多。例如：瑞典 Arcam AB 公司研制的电子束快速成形系统所用的电子束功率为 4 kW，所需的输入功率仅为 7 kW。

2）功率高　电子束可以容易地做到千瓦级的功率输出，甚至可达 200 ~ 300 kW；而大多数激光器功率在 1 ~ 5 kW 之间，最大的 CO_2 激光器功率为 45 kW。

3）可加工材料广泛　电子束不受加工材料反射的影响，对于各类金属都有很好的、稳定的吸收率。因而可应用于范围广泛的材料加工，并有利于梯度材料的成形加工。而在激光加工中，某些材料（如：金、银、铜、铝等）对激光的反射率高，吸收率低，并且熔化潜热很高，不易熔化，需要足够高的能量密度才能产生熔池。而且熔池一旦形成，对激光能量的吸收率迅速升高，从而使熔池温度急剧升高，导致材料汽化。

4）电热转换率高　电子束是依靠电子束流轰击材料，将能量直接传递给材料表层的电子，并以热能的形式传递给表层的点阵原子。因此电热转换效率在 90% 以上，且不受材料表面性质的影响。

5）加工速度更快　电子束设备靠磁偏转线圈操纵电子束的移动来进行二维平面扫描，不需运动部件，无机械惯性，扫描频率可达 20 kHz。相对于激光依靠反射镜或数控工作台运动来实现平面扫描，速度要快许多倍，因而可以做到 3 ~ 10 帧/秒的投影式扫描（即在扫描第一点的温度还没有降低时，已完成了整个区域的扫描），能极大地改变选区烧结/重熔的工艺条件。

6）运行成本低　根据国外统计，电子束运行成本仅是激光器运行成本的一半或更低。激光器在使用过程中需要消耗保护气体，如 He，N_2，CO_2 等，尤其是 He 的价格较高；电子束一般不消耗气体，仅消耗价格不算很高的阴极灯丝，而且消耗量不大。



7）设备可维护性好　电子束加工设备零部件少的特点使得其维护非常方便，通常只需更换灯丝；激光器拥有的光学系统则需经常进行人工调整和擦拭，以便其最大功率的发挥。

然而电子束应用也有其不方便的地方，限制它的广泛应用。主要表现在电子束加工必须在真空环境中进行，从而使得工件尺寸受到一定限制，而且真空系统在一定程度上增加了电子束加工设备的复杂性和实现难度。

但从另一方面考虑，真空环境对于材料加工也有有利的方面。在真空环境下材料不会发生氧化反应，这对于避免组织缺陷，保证材料性能，提高成形质量大有好处。而激光虽然可在非真空的条件下使用，但也常需要He、N_2等辅助气体保护，且这些气体一般不可重复使用。在某些要求较高的场合，激光加工也要求置于真空环境中进行。

表6.13-1是电子束和激光的部分特征比较。

表6.13-1　电子束和激光的部分特征比较

项目	电子束	激光
电光（热）转换率	>90%	15%~20%
防止反射	不需要防止反射，反射率为0	需涂敷反射剂，反射率为40%
气氛条件	真空	大气（但需要辅助气体）
对焦	通过控制聚束透镜的电流调节（100~600 mm）	由于透镜的焦距是固定的，所以要移动工作台
束偏转	用电控制，可以选择任意图形	必须更换反射镜，图形是固定的
设备运转费	<1/2	1（以激光运转费为1计算）

2.2　电子束与激光的应用领域比较

电子束与激光的共同应用领域有焊接和热处理，电子束加工还能进行打孔、蒸镀与熔炼。激光加工还能进行切割、雕刻、打标、钻孔、切削等工作。

1）技术层面比较　焊接和热处理均是电子束和激光应用的主要对象。电子束焊接和激光焊接都具有焊缝窄、穿透深、热影响区小及变形小等特点，但电子束焊接在真空中进行，工件的大小受真空室尺寸的限制，每次装卸都需要重新抽真空，焊缝定位不方便；激光焊接在大气中进行，工件尺寸不受限制。此外，电子束焊接的熔透能力比激光焊接差。

电子束热处理质量比激光高。因为用激光对工件进行热处理需要在工件表面进行涂黑处理，要涂敷均匀很不容易，继而很难得到均匀的硬化层；电子束热处理则不存在黑化问题，而且是在真空中进行处理，工件表面不易氧化，并且还伴有脱气，处理完后表面光亮，故可获得很高的表面质量。此外，激光热处理时最好垂直入射，而电子束轰击表面的角度没有特殊限制。但是，热处理通常要求的功率密度比切割和焊接低得多，注入功率也不需要很大，因此一般说来激光更适合于热处理，这也是激光热处理远比电子束热处理应用面广的根本原因。

小功率激光加工无论在应用范围或是经济性能方面，都比电子束加工占有明显的优势，除电子束曝光外，激光均有取代电子束的趋势。

在大功率高能束加工方面，激光目前仍只限于薄件的切割和焊接，以及零件的打标和局部表面处理。对大厚度零部件的焊接，如后桥壳、轴头、变速箱体、重型变速齿轮、大马力柴油机活塞等的焊接，仍然以采用电子束焊接为宜。因此，在大功率方面电子束加工独树一帜，大功率电子束焊接已大量用于发电设备、石化设备、矿山机械、重型汽车、航空航天器、原子能设备和造船工业中，典型的应用是焊接反应堆基体和汽轮机转子轴等承力件，其熔深在300 mm以上。此外，大功率激光器的运行稳定性和可靠性以及参量的控制灵活性等方面也不如电子束。

2）经济层面比较　经济因素在高能束加工方面也具有一定的影响作用。一般来说，激光和电子束都能满足大多数焊接和热处理应用要求，如何选用则要根据具体情况而定。例如，焊接汽车变速齿轮时，国外因电子束和同等效率的激光设备成本大致相同，厂家往往更多考虑对产品规格型号改变时的适应性而选用激光。因此，若不要求更高的生产率时，选用电子束会更经济。若需要得到更高的生产率和为今后变换产品规格时能较好地适应，宜选用激光。

3）设备可靠性　此外，设备的可靠性也影响着二者的使用。激光器作为设备中的一个主要的独立部件，有专门的厂家制造，有不同的品牌、规格、型号。加工设备的制造厂家可以根据需要合理地选配不同的激光器，最大限度地发挥激光器的效能，也能保证设备总体的可靠性和稳定性。而电子束设备的生产基本上还是各大组成部分集于一家的生产方式，很难有一个企业在光、机、电的各个方面都很专长，因而设备故障率也相对更高些。

2.3　电子束与激光在快速制造领域的应用特点比较

三维快速成型技术的出现，为小功率激光器开辟了一个极其重要的应用领域。立体光刻工艺由Charles Hull于1984年获美国专利，采用紫外激光对光敏树脂进行曝光成型。随后，中小功率的CO_2和Nd:YAG激光器作为激光选区烧结（SLS）和激光叠层实体制造（LOM）方式的热源得到了迅速发展。最近，中、大功率的激光器在激光熔覆近形快速制造方面得到了广泛的研究，并已逐渐成为金属零件直接快速制造的一种主要加工热源。电子束作为快速制造领域的加工热源是在2000年后才开始的，电子束与激光相比具有的特点也得到了又一次展现。

在SLS工艺中，电子束除了具有激光的相关优点外，还具有以下独特的优点：

1）避免氧化　电子束的真空环境可以避免金属粉末在液相烧结过程中氧化，而且绝大部分粉末烧结产品的尺寸不大，符合真空工作室不大的特点。

2）功率利用率高　电子束功率大，能量利用率高，设备投资和维护成本低，符合21世纪绿色制造宗旨。

3）成形速度快　电子束设备靠磁偏转线圈操纵电子束的移动来进行三维实体制造，而激光必须更换反射镜或依靠数控工作台的运动来实现该功能。与激光相比，电子束的移动更加方便且无运动惯性，因而可以实现快速扫描，成形速度快。

通过以上特征和工艺的比较，我们可以得出：电子束必须在真空环境下工作限制了其在焊接方面的广泛应用，但在热处理技术方面，就其发展前途来看，电子束也许还有后来居上的可能。在快速制造方面，电子束的真空环境下可以避免金属粉末在液相烧结过程中氧化；而且绝大部分粉末烧结产品的尺寸不大，电子束功率大，能量利用率高，符合21

世纪绿色制造宗旨，因而可以利用电子束进行快速制造。

目前出现的电子束快速制造技术主要有类似 SLS 的电子束选区熔化/烧结快速制造技术和电子束熔覆快速制造技术。其中，前者主要由瑞典 Arcam 公司申请专利并进行商品化运作，从事后者研究的主要有美国 MIT 学院和美国 NASA Langley 研究中心等。

3　电子束选区熔化快速制造技术

3.1　定义及特点

与激光选区烧结类似，电子束选区熔化快速制造技术利用金属粉末在电子束轰击下熔化的原理，先在铺粉平面上铺展一层粉末；然后，电子束在计算机的控制下按照截面轮廓的信息进行有选择的烧结，金属粉末在电子束的轰击下被烧结在一起，并与下面已成形的部分粘接，层层堆积，直至整个零件全部烧结完成；最后，去处多余的粉末便得到所需的三维产品。图 6.13-4 为其原理示意图。试验过程中，将0.1 mm厚的金属粉末铺置在工作平台上，先用低束流和高扫描速度的电子束对粉末层进行预热，然后通过提高束流功率和/或降低扫描速度使粉末熔化，该层成形完毕后，工作台下降一定高度、铺粉，进行工艺循环，直至零件全部完成。

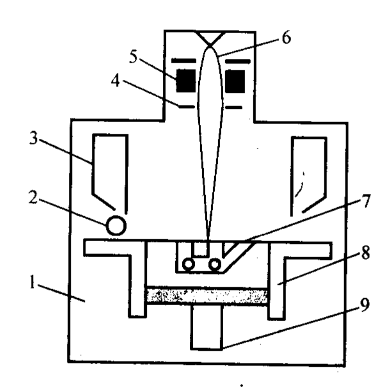


图 6.13-4　电子束选区熔化快速制造技术原理示意图

1—真空室；2—铺粉滚轮；3—供粉箱；4—偏转线圈；5—聚焦线圈；6—电子束；7—成型零件；8—成型缸；9—升降台

电子束选区熔化快速制造技术在航空、航天、汽车及生物制造等方面存在巨大的应用前景。与传统制造工艺相比具有以下优点：

1）电子束熔化快速制造技术基于离散 - 堆积原理，因此可以成形任意形状的零件；

2）电子束功率密度高，制造零件所需时间非常短；

3）无需工装与模具；

4）材料利用率高，未熔化的粉末可以重新利用，可以节省大量的材料费，如钛粉。

与类似的激光选区烧结/熔化工艺相比具有以下优点：

1）在真空环境下成形，金属氧化的程度降低了，零件的强度高；

2）采用电子束而不是激光，能量利用率提高了，熔池无反射现象发生；

3）电子束的偏转扫描速度远高于 SLS 工艺中通过机械运动实现的扫描速度，无机械惯性；

4）与激光器相比，电子束设备维护方便，运行成本低；

5）电子束固有的真空环境为材料成形提供了一个良好的热平衡系统，从而提高了成形的稳定性，零件的热平衡也能够得到很好的控制。

3.2　粉末状态分析

电子束选区熔化金属粉末快速制造技术中，经常会出现粉末被真空室抽气瞬间的气流及电子束的压力推开的现象，导致金属粉末在成形熔化前即已偏离原来位置，从而无法进行后续成形工作，下面对这两种情况进行分析。

3.2.1　真空室抽气对粉末状态的影响

真空室在开始抽气的瞬间真空泵的抽速迅速达到最大值，此时金属粉末最有可能受存在于金属粉末空隙中气体流动的影响而悬浮。气体自下而上流过单个金属粉末时，如果金属粉末的净下降力 G 小于气体与其相对运动产生的拖力 F_d 时，金属粉末就会被悬浮或随气流上升进入真空系统，从而造成设备的损坏。

抽真空时，粉末最易悬浮的受力状态是受到垂直向上的升力 F_d 作用，如图 6.13-5 所示。

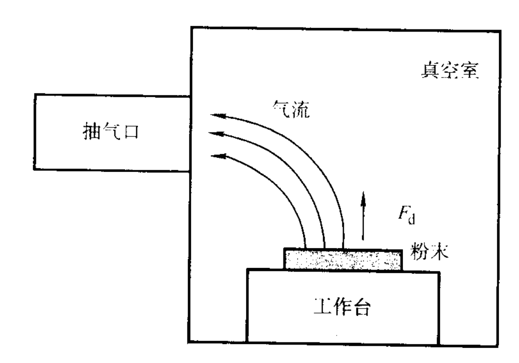


图 6.13-5　金属粉末受气流作用示意图

真空泵在 1 个大气压下的抽气速率为 S，泵抽气口的直径为 d，真空室截面积为 A，则气流速度 v_0 为

$$v_0 = \frac{S}{A} \tag{6.13-6}$$

以单颗粉末为例

$$G = \frac{4\pi}{3} r^3 (\rho - \rho_s) g \tag{6.13-7}$$

$$F_d = K \frac{(v - v_s)^2}{2} \rho_s \frac{\pi d^2}{4} \omega^{-4.7} \tag{6.13-8}$$

$$R_e = \frac{d v \rho_s}{\mu} \tag{6.13-9}$$

式中，v 为金属粉末悬浮所要求的气流速度，m/s；v_s 为粉末的绝对速度，m/s；g 为重力加速度，$g = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$；ρ_s 为空气密度，$\rho_s = 1.225\ \mathrm{kg/m^3}$；$\rho$ 为金属粉末的密度，$\mathrm{kg/m^3}$；d 为金属粉末的最小直径，m；ω 为金属粉末的空隙率，$\omega = 0.5$；K 为球形粉末绕流摩阻系数，与 R_e 有关；μ 为气体的运动黏度，对于空气 $\mu = 13.2 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}$。

v_s 为 0 时的气流速度 v 是金属粉末悬浮所要求的临界气流速度，当 $v_0 > v$ 时，金属粉末会被气流带走；当 $v_0 < v$ 时，金属粉末保持原状态，不会被气流带走；当 $v_0 = v$ 时，金属粉末处于悬浮状态。

设 $(\rho - \rho_s) \approx \rho$，$(v - v_s) = v$，$F_d = G$，则

$$v = \sqrt{\frac{8 r g \rho \omega^{4.7}}{3 K \rho_s}} \tag{6.13-10}$$

在真空室不同部位，气体流速 v_0 不一样，进气口附近，由于气流截面积 A 最小，因而气体流速 v_0 最大；其他部位由于气流截面积较大及气流的不均匀性，气体流速 v_0 相对较小。通过计算真空室不同部位的气体流速 v_0，并与气流速度 v 比较，即可判断出粉末实际所处状态，从而可以避免将粉末置于有可能处于悬浮状态的区域。

以 THDW－3A 电子束焊机采用的 2X－30 旋片真空泵为例，其在 1 个大气压下的抽气速率 S 为 0.03 m^3/s，泵进气口的直径 d 为 65 mm，真空室尺寸为 0.4 m×0.4 m×0.5 m，取真空室与泵抽气口所在的横截面（情况 1）和工作台粉末所在横截面（情况 2）两个不同部位分别进行计算，所得结果如表 6.13-2 所示。

表 6.13-2 真空室不同部位气体流速计算结果

情况	A/mm^2	$v_0/m\cdot s^{-1}$	R_e	K	$v/m\cdot s^{-1}$
1	3.32×10^{-3}	9.04	42	1.966	7.48
2	0.2	0.15	0.696	34.5	1.78

情况 1 中 $v_0>v$，金属粉末极易被悬浮。情况 2 中 $v_0<v$，金属粉末不会悬浮起来。因此，试验过程中应尽量避免粉末靠近抽气口，或者将抽气口的位置布置在真空室后壁的上部，工作台与抽气口不应处在同一水平高度，两者的高度应尽可能大。实验中，工作台离抽气口的垂直距离为 200 mm，工作台中心与抽气口的距离为 200 mm。图 6.13-6 为电子束熔化粉末成形装置及成形的试件，在选定工艺参数的成形试验过程中没有发现金属粉末在抽真空过程中有被扰动的痕迹。

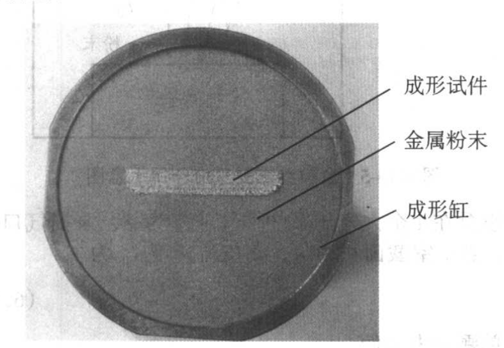


图 6.13-6 气雾化 316L 不锈钢粉末熔化成形装置及成形的试件

3.2.2 电子束压力对粉末状态的影响

电子束轰击金属粉末时引起的压力 F_0 可用电子与金属粉末碰撞时的动能损失来计算。

$$F_0=I_a\sqrt{\frac{2m_eV_a}{e}} \qquad (6.13\text{-}11)$$

式中，I_a 为电子束电流，A；V_a 为电子束加速电压，V；e 为电子电荷，$e=-1.6\times10^{-19}$ C；m_e 为电子质量，$m_e=9.1\times10^{-31}$ kg。

试验过程中加速电压恒定为 60 kV，电子束与粉末的相互作用分两种情况：第一种情况是电子束直径比金属粉末直径大，电子束轰击金属粉末的作用力作用在多个粉末上；第二种情况是电子束直径和金属粉末直径相当或比金属粉末直径小，电子束轰击金属粉末的作用力完全作用在单一粉末上。

情况 1：

电子束直径为 d_0（$d_0\geqslant d$），其横截面积是金属粉末的 n 倍（$n=d_0^2/d^2$），单颗金属粉末承受的作用力 $F=F_0/n$。金属粉末的堆积状态如图 6.13-7 所示，则电子束垂直作用在上层金属粉末的作用力 F 传递给下层粉末时的作用力 $F_1=F\sin(60°)$，颗粒的水平推力

$$F_x=F_1\sin(30°)=F\sin(60°)\sin(30°) \qquad (6.13\text{-}12)$$

粉末之间的摩擦因数为 μ，电子束推动金属粉末的水平摩擦阻力 f 为

$$f=\mu(G+F_y) \qquad (6.13\text{-}13)$$

当 $F_x\geqslant f$ 时，金属粉末会被电子束“推开”。由此可见，f 小于水平推力 F_x，表现在试验过程中的现象就是只要电子枪一下束流，金属粉末就会被推开，根本来不及参与熔化成形。

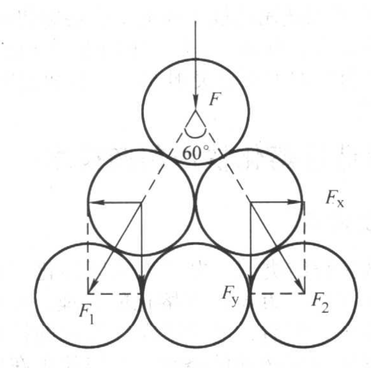


图 6.13-7 电子束作用在金属粉末上的受力分析

情况 2：

电子束直径和金属粉末直径相当或比金属粉末直径小，单颗金属粉末承受的作用力就是电子束轰击金属粉末的作用力 F_0，其它分析同情况 1。

从上面的分析可以看出，为了避免金属粉末被电子束“推开”，电子束的直径、金属粉末的摩擦因数和金属粉末的密度都不易过小，电子束电流和加速电压不易过高。

试验用材料为气雾化 316L 不锈钢粉末，平均粒径为 75 μm，最小粒径为 50 μm，颗粒形状为球形，松装密度 ρ 为 $3.5\sim4.9\times10^3$ kg/m^3，粉末的扫描电镜照片如图 6.13-8 所示。

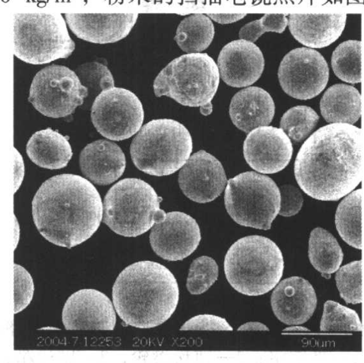


图 6.13-8 气雾化 316L 不锈钢粉末的扫描电镜照片

实验过程中通过调整聚焦电流使电子束直径维持在 0.2 mm水平，电子束直径比粉末的最小直径大（直径最小的粉末最易被电子束推开），n 等于 16，因此，电子束与粉末的相互作用符合情况 1。实验测定的粉末间摩擦因素为 0.45。

表 6.13-3 列出了 4 种电子束电流作用在金属粉末上的水平推力和摩擦阻力值，并将其与实验过程中粉末的实际状态进行了对比。编号 1 中粉末被完全推开；编号 2 考虑金属粉末表面的氧化及带电荷情况，粉末被推开的可能性仍然较大；编号 3 中摩擦阻力远大于水平推力，粉末被推开的可能性迅速降低；编号 4 中摩擦阻力和水平推力差 2 个数量级，粉末不会被推开。

表 6.13-3 电子束作用下金属粉末水平推力与摩擦阻力的比较

编号	I_a/mA	$F_x/10^{-9}$ N	$f/10^{-9}$ N	粉末状态
1	10	7.064	5.961	完全被推开
2	1	0.706	2.654	易被推开
3	0.5	0.353	2.469	不易被推开
4	0.1	0.071	2.322	不会被推开



图 6.13-6 成形试件采用的电子束电流为 0.3 mA，介于编号 3 和编号 4 之间，金属粉末没有被电子束电流引起的作用力所推开，均参与了熔化成形。由于成形所用电子束电流偏小，试件的致密性较差。

解决粉末被电子束电流推开的途径除了降低电流外，还有两条途径：第一条途径是通过适当改变粉末的表面状态和堆积方式。比如选用流动性稍差的水雾化粉末，其表面形状不规则，粉末间的摩擦因素较大；或者选用不同粒径的粉末混合均匀后提高金属粉末的松装密度；或者采用压实装置将粉末密实。第二条途径是采用不同的成形工艺，先用较低的束流和较高的扫描速度对粉末层进行预热，其目的是使粉末间发生轻微烧结，以使得在后续高束流和或低扫描速度熔化过程中粉末能够被固定在原位，金属粉末一旦形成初始熔池，热量就会很快传递给周围的粉末，液态金属对固体粉末的吸引力也远大于固体粉末之间的作用力，从而将它们"固定住"，粉末被电子束压力推开的可能性急剧降低，从而达到电子束熔化的目的。

3.3 电子束熔化快速制造系统

瑞典 Gothenburg 的 Arcam AB 公司研制并开发成功的 EBM S12 设备在 2003 年售出了 4 台，美国北卡罗来纳州大学、英国 Warwick University、波音公司及某著名汽车公司均成为了其用户，英国剑桥真空研究所 CVE 还和 Arcam AB 公司签署了代理协议，大力将该设备推向航空及航天领域。

图 6.13-9 为 EBM S12 的设备图，其主要结构：电子枪、真空室、真空系统、高压电源系统、扫描偏转线圈、控制系统、送铺粉机构、自动升降工作台、检测装置及控制计算机。此外，为了保护设备安全及操作者免受射线的辐射，整台设备被薄钢板组成的外壳包裹，窗口上安装铅玻璃。

1）电子枪　由三个部分组成，底部有一个水冷装置和一套能对焦的透镜系统；中部是阳极；上部与高压电源相连，包括阴极、控制电极和调整螺丝。

2）真空室　由 20 mm 厚的不锈钢板采用 TIG 工艺焊接而成。

3）真空系统　包括一个 260 L/s 涡轮泵和一个 10 m^3/h 机械泵。真空系统由与控制计算机相连的 PLC 控制。

4）高压电源系统　包括两套系统，其中一套产生 60 kV 电压，另一套产生控制电极电压和灯丝电流，所有操作均由计算机控制。

5）扫描偏转线圈　扫描偏转线圈是 EBM S12 设备的主要部件，决定着电子束的偏转能力。

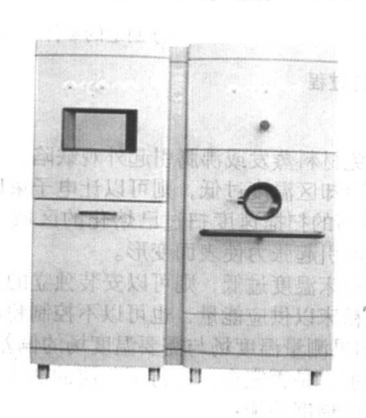
6）控制系统　控制和检测的部分主要有真空系统、电子束聚焦及扫描偏转系统、工作台升降及铺粉装置。

7）送铺粉机构　两个由不锈钢焊接而成的粉筒及一套将粉末铺平的装置。

8）自动升降工作台　由伺服电机驱动。

9）温度检测装置　包括一台用来检测粉末床表面温度的红外摄像机和一套自动进给保护膜装置保证摄像机对着的窗口保持透明。

10）计算机　由一台工业控制计算机负责零件的三维造型、层片数据处理及控制系统。



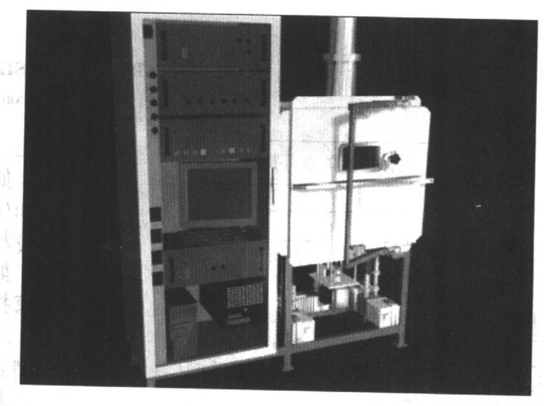


图 6.13-9　瑞典 ARCAM AB 公司开发的 EBM S12 设备

（来自 www.arcam.com）

表 6.13-4　ARCAM EBM S12 设备技术参数

成形空间	250 mm × 250 mm × 200 mm（长 × 宽 × 高，下同）
最大成形件尺寸	200 mm × 200 mm × 160 mm
精度	±0.4 mm
熔化速度	0.3～0.5 m/s（依材料而定）
层厚	0.05～0.2 mm（依材料而定）
电子束扫描速度	≤20 m/s
电子束定位精度	±0.05 mm
能量提供	3 × 400 V，32 A，7 kW
设备尺寸及质量	1 800 mm × 900 mm × 2 200 mm，1 350 kg
计算机	PC，Windows2000，XP Professional
CAD 格式	STL
网络	以太网 10/100
认证	欧洲 CE

清华大学激光快速成形中心在国家自然科学基金的资助下也进行了电子束熔化金属粉末快速制造系统及工艺的开发与研究，工艺名称为电子束选区熔化快速制造 EBSM（Electron Beam Selective Melting），该中心与桂林狮达机电有限公司合作开发的电子束熔化快速制造设备如图 6.13-10 所示。

3.4 电子束熔化快速制造工艺

EBM 快速成形过程如图 6.13-11 所示，具体工艺过程如下。

1）零件在计算机中进行三维 CAD 造型后转换成 STL 文件；

2）采用专用的分层软件进行切片处理及工艺规划，得到层片文件；

3）电子束设备开机预热；

4）粉末放置到安放在真空室的送粉装置中，抽真空；

5）当工作室的真空度达到要求后，送铺粉装置开始工作，在成形工作台上面铺一层金属粉末；

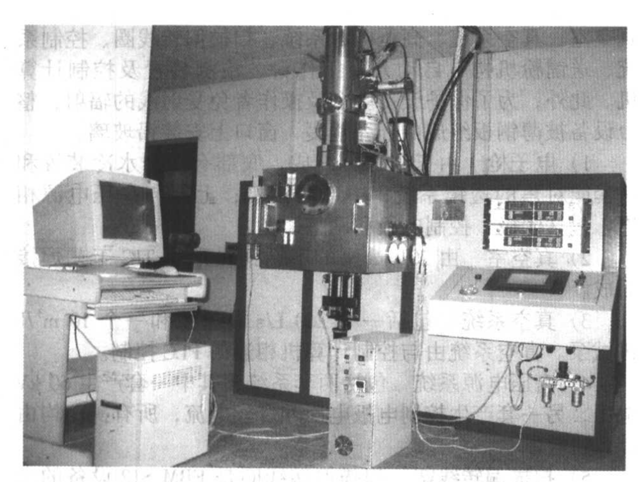


图 6.13-10　EBSM 设备
（清华大学激光快速成形中心提供）

6）电子束按照层片文件得到的截面轮廓信息进行偏转，将粉末熔化；

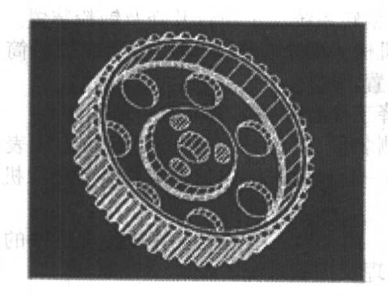
7）表面特征检测装置实时检测表面温度场及表面不规则性阴影，并运行校正程序；

8）该层成形完毕后，进行下一层的送粉、铺粉及电子束熔化等工作，层层堆积而成零件；

9）成形结束后，真空室放气，并用专用装置将成形件取出；

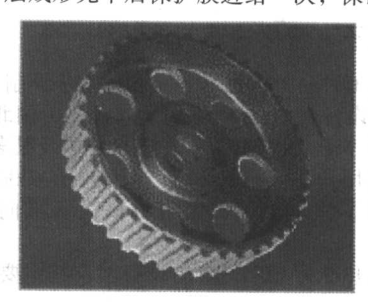
10）成形件经过喷砂处理后，即可采用传统加工工艺对其进行后续加工。

在上述工艺过程中，电子束按照截面轮廓进行实时偏转和表面特征的检测是两项关键技术。其中，通过安装在设备壳体上的红外摄像机对表面特征进行检测的作用有两个：第一是检测表面层温度分布，第二是通过表面不规则性形成的阴影来测量表面粗糙度（见图 6.13-12）。为了避免金属蒸气模糊红外摄像机观察窗口，在观察窗口内部设置了一进给式保护膜装置，每层成形完毕后保护膜进给一次，保证下一次



(a) CAD 模型

(b) 成形过程



(c) 制造的零件

图 6.13-11　ARCAM EBM S12 制造过程
（来自 www.arcam.com）

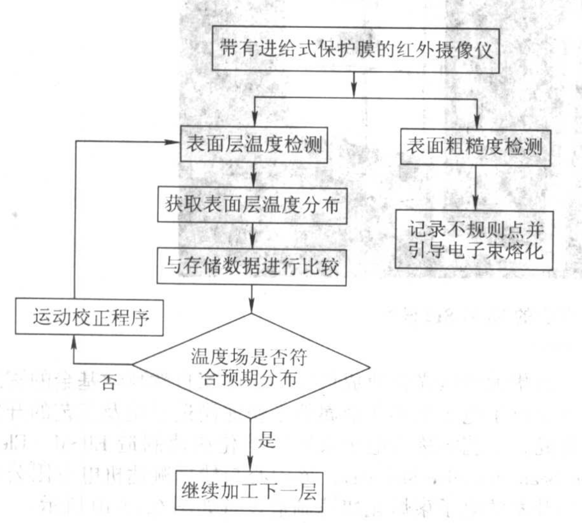


图 6.13-12　表面特征检测程序

的观察窗口清晰。

表面层温度检测步骤如下：

1）首先，用红外摄像机拍摄正在熔化的区域、凝固区域及未被加工的粉床区域，得到各个小的子区域温度组成的表面层温度场 $T_{ij-measured}$；

2）然后，将温度场数据传到控制计算机并与存储（事先设定好）的数据 $T_{ij-desired}$ 进行比较。比较内容主要包括熔化区最高温度 T_{ij-max}、已凝固区最低冷却温度 $T_{ij-coooling-min}$ 和粉床温度 T_{ij-bed}。

如果熔化区温度过高，则通过改变束功率或扫描速度来校正，以免材料蒸发或沸腾引起外观缺陷。

如果冷却区温度过低，则可以让电子束以较低的能量密度和/或较高的扫描速度扫过已熔化的区域，以免由于过低的冷却温度引起张力使表面变形。

如果粉床温度过低，则可以安装独立的加热装置或使射线束扫过粉床以供应能量，也可以不控制粉床温度。

3）如果测量温度场与需要温度场的偏差在合理范围内，检测表面加工是否完全，进行下一层的加工。

表面粗糙度检测：

来自摄像机的输入型号可以用来识别电子束熔化粉末后的表面形貌。当表面不规则性的坐标被识别后，运行程序引导电子束到所识别的坐标上，熔化掉凸起部分。

采用 EBM 技术制造的零件可以采用传统的工艺，如高速车、铣、磨和电火花进行后续加工。表 6.13-5 为采用 EBM 技术制备的材料力学性能，结果表明材料具有很高的屈服和极限强度。

清华大学激光快速成形中心开发的电子束选区熔化快速制造的工艺流程如图 6.13-13 所示，其中，针对电子束与粉末相互作用容易发上电子束“推开”粉末、粉末聚球、成形面片断裂等现象，粉末熔化要经过三个阶段：①“固定粉末”阶段；②粉末升温阶段；③粉末熔化阶段。

1）“固定粉末”阶段　这个阶段通过对粉末进行适当预热使得粉末黏结在一起，以便为下一阶段加大功率密度做准备。

2）粉末升温阶段　固化后的粉末升温阶段能量要集中（功率密度增大，扫描速度降低），以保证输入的热量能将粉末迅速升温到一定的温度。

3）粉末熔化阶段　熔化成形阶段不仅要保证粉末熔化，



表 6.13-5　采用 EBM 技术制造的零件性能（Arcam 公司提供）

材料	粉末特性		力学性能						应用领域
	表观密度 /g·cm^{-3}	粒度/μm	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	冲击吸收功 /J	硬度	线胀系数 /$10^{-6}K^{-1}$	
H13 工具钢	2.5	< 100	1 430	1 760	8	48 ~ 52HRC	14.0	注塑模、压铸模、小批量制造
低合金钢 200	3	< 100	290	540	7	180 ~ 220HB	14.0	原型件、软模小批量制造
Ti - 6Al - 4V			880	930	—	30 ~ 35HRC		人体植入物

而且要保证温度场均匀，因为这时松散的粉末已经开始黏结在一起，温差过大容易产生热应力，所以扫描速度要快。

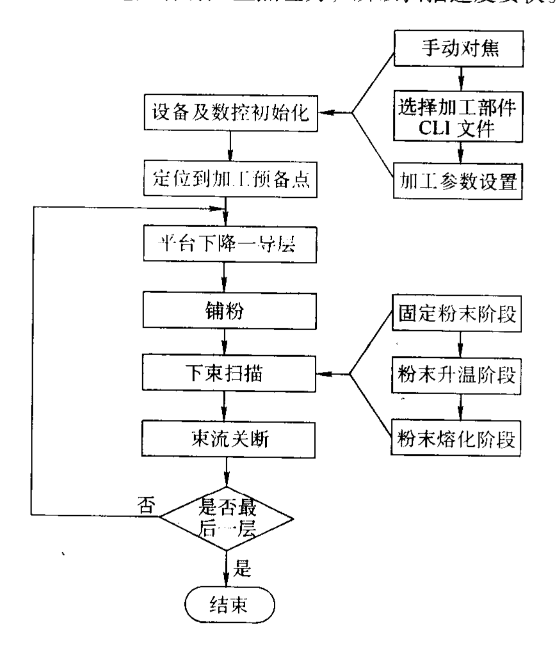


图 6.13-13　电子束选区熔化快速制造 EBSM 的工艺流程图

该中心在利用电子束选区熔化金属粉末的过程中，同样发现电子束与金属粉末材料相互作用过程中的温度场分布是影响成形件致密化程度的重要因素，也是确定选区熔化成形工艺参数的重要依据。特别是对于具有高熔点的金属粉末，其熔化成形需要较高的温度，涉及材料的相变，而且成形区域较为全面的温度分布情况较难通过测量手段获取。因此，通过数值分析的方法对选区成形工艺进行了模拟，搞清成形区域温度分布情况，进而优化工艺参数，对于获得高尺寸精度、高质量的金属零件具有十分重要的意义，同时也可避免或减少大量的工艺实验。如果能通过温度场数值模拟事先得到合理的工艺参数，则可以避免使用昂贵的红外成像仪设备。

电子束选区熔化成形过程中温度场的特点：存在一个移动的内热源，温度场为非稳态；热源集中，温度变化率大；温度变化大，存在相变。这个移动内热源的影响区域包括该层及已成形层，对还没有生成的层及其单元不起作用。ANSYS 软件中“死活单元”技术与本工艺类似，其在每个增量步中，逐个激活单元，单元激活的时间由扫描速度决定。ANSYS“死活单元”基本原理：将模型中没有扫描到的单元‘杀死’。但 ANSYS 程序并不是将‘杀死’的单元从模型中删除，而是将其刚度矩阵乘以一个很小的因子。死单元的单元载荷将为 0，从而不对载荷向量生效。同样，死单元的质量、比热容和其他类似效果也设为 0 值，死单元的质量和能量不包括在模型求解结果中。当扫描到先前被‘杀死’的单元位置时，则需要重新“激活”这些单元。当一个单元被重新“激活”时，其刚度、质量、单元载荷等将恢复其原始的数值。

在快速制造领域，很多成形工艺都适用于“死活单元”法，比如，FDM 和 LENS 技术中，单元就是依据扫描路径逐个“激活”过来，SLS 技术虽然单元也需要经过先“杀死”后“激活”的过程，但与 FDM 和 LENS 技术不同的是，SLS 技术中的单元需要逐层“激活”。基于该思路，提出了适合于 EBSM 和 SLS 技术的单元逐层死活算法。

单元逐层死活算法：选区熔化成形技术中，粉末是逐层铺加的，这意味着每层单元要一同“激活”过来，然后再采用二维移动载荷在这层“激活”过来的单元中依次施加载荷。二维移动载荷的路径与按照分层文件得到的单向填充路径一致，奇数层沿 x 方向进行扫描，偶数层沿 y 方向进行扫描，这部分工作在单元划分完毕后在层内排序进行的。

具体算法如图 6.13-14 所示。

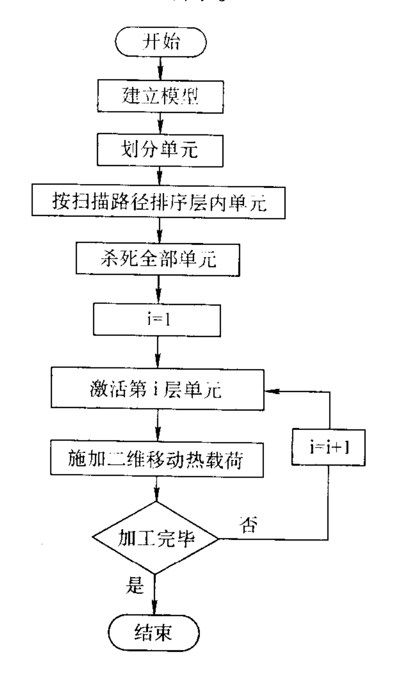


图 6.13-14　单元逐层死活算法

电子束作用于金属粉末的作用力会造成粉末的“散开”，因此，不能一次将热载荷完全作用于金属粉末上，需要多级加载，这样做的好处之一是利用电子束所产生的热量将松散堆积的粉末进行一定程度的“粘接”，减少“散开”的可能性；好处之二是可以保持成形区域的温度场较为均匀，从而降低热应力，减少成形件变形、开裂等缺陷的发生。每级加载的载荷强度和作用时间是主要的工艺参数。为此，在单元

逐层死活算法的基础上提出了适用于 EBSM 技术的多级加载单元逐层死活算法：即在每层粉末熔化过程中，分多次扫描成形区域，最终达到选区熔化。具体计算过程如图 6.13-15 所示：

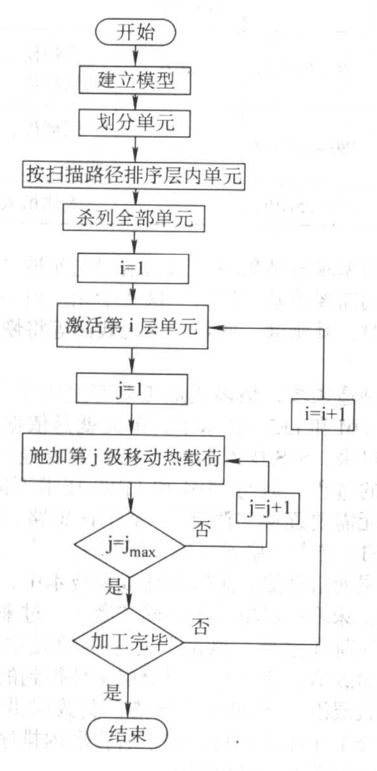


图 6.13-15　多级加载单元逐层死活算法

3.5　电子束熔化快速制造技术的典型应用

电子束在快速制造领域的应用具有宽阔应用前景，除了可以制造小批量多品种的金属零件及注射模、压铸模等模具外，还具有下列应用前景。

1）医学方面的应用　目前在人体骨骼的损伤修复中，金属（主要是钛或钛合金）植入物是最重要的治疗手段，如每年有超过 50 万美国人接受髋骨或膝盖植入手术，以使磨损的关节重获功能。然而在实际应用中，由于每个病人的骨骼形状不尽相同，标准化生产的植入物不能适应病人个性化的骨骼结构和形状，需要在术中手工修配。从而延长了手术时间，增加了手术的危险性。同时，即使经过了修配，仍不能保证植入物与病人骨骼很好的配合，造成骨骼和植入物受力不均匀，加重了骨骼的不良反应，导致植入物寿命缩短。

改进的方法是一方面对植入物的表面进行处理、改性，提高植入物与人体骨骼的相容性和结合性，另一方面是利用人体骨骼的断层扫描图像（如 CT 扫描图像）重构的模型，制造病人个性化的骨骼原型，辅助植入物的设计与制造，改善植入物与病人骨骼的配合性能。

随着金属零件快速制造技术的发展，将来可以在计算机中根据病人的骨骼模型，设计相应的金属植入物，经过模拟仿真校验后利用快速成形工艺直接制造出植入物。这样可大大提高植入物与病人骨骼的配合性能，避免或减少不良反应，节省手术时间，大大降低手术的危险性。

钛或钛合金易氧化的特性使得基于电子束的快速制造技术在人体植入物上的应用具有十分重要的位置，图 6.13-16 为美国南加州大学快速原型实验室采用 EBM S12 设备成形的钛合金人体植入物。图 6.13-17 为多孔钛合金板。



图 6.13-16　人体钛合金植入物
（来自 www.arcam.com）

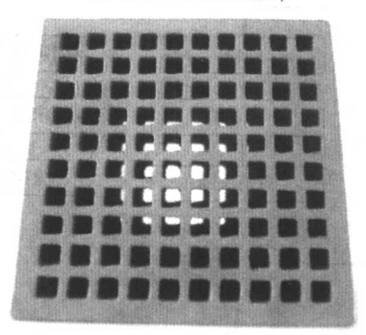


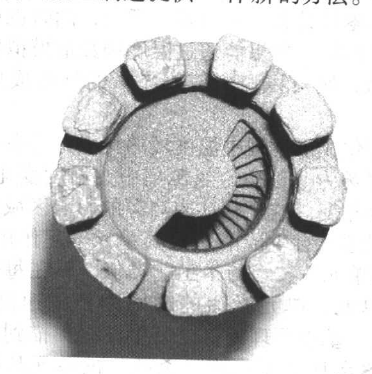
图 6.13-17　采用 EBM 技术制造的钛合金板
（来自 www.arcam.com）

2）航空航天零部件加工制造　航空航天零部件的性能要求高、批量少，制造加工工艺复杂、设备投资大、成本高。如高性能航空发动机涡轮盘的制造需要超大型的模锻液压机（300 MN 以上），或采用粉末冶金、热等静压和等温锻技术等，工艺极其复杂且难度极高。再如飞机隔框通常为铝合金或钛合金，需要高质量的模锻毛坯或预拉伸板以及大量的数控加工，需要昂贵的设备和很长的加工周期。

基于电子束的金属零件快速成形工艺为上述高性能航空航天零件的加工制造提供一种新的方法。图 6.13-18 为采用



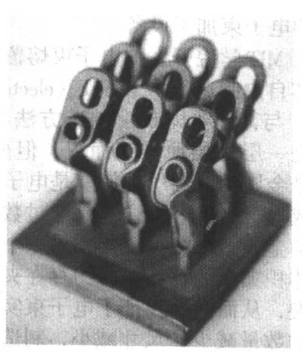
(a)　金属零件机加工后

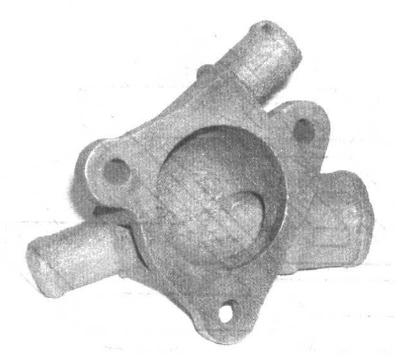


(b)　钛合金国际象棋

图 6.13-18　采用 Arcam EBM 技术制造的金属零件
（来自 www.arcam.com）

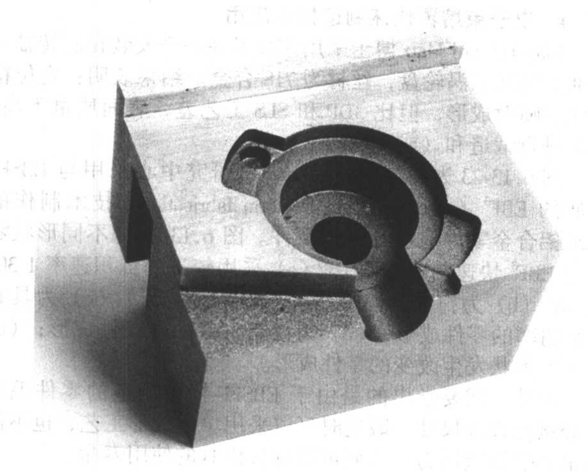



(c)　原型件


(d)　功能件

续图 6.13-18

电子束熔化快速制造技术制造的金属零件。图 6.13-19 为采用电子束熔化快速制造技术制造的金属模具。


图 6.13-19　采用 Arcam EBM 技术制造的金属模具
（来自 www.arcam.com）

4　电子束熔覆快速制造技术

4.1　电子束熔炼技术

电子束熔炼是利用高能量密度的电子束对材料加热进而熔化的一种电加热熔炼技术。其工艺过程如下：电子束由一把电子枪发出，束的直径很大，一部分电子打在原料锭上，使原料熔化并滴下，落到熔池内，熔滴的速度取决于轰击原料锭的那部分电子束的功率，其他的电子束打在熔池上，使材料全部熔化，并在水冷结晶器的作用下凝固成锭。为了保持熔池内的金属液的高度不变，金属锭要不断向下拉动，逐渐形成一根铸锭。图 6.13-20 为电子束熔炼炉的示意图。

电子束熔炼对于难熔金属与活性金属的铸锭是非常有用的，因为电子束的功率密度高，很容易熔化高熔点的难熔金属，而真空熔炼时真空的保护作用，有利于气体的消除，保护活性金属不受影响。

电子束熔炼与真空感应熔炼、真空电弧熔炼、等离子弧熔炼等熔炼工艺相比，具有独特的优点。

1）高能量密度的电子束电热转换效率高，比其他电加热熔炼方法高得多。

2）高能量密度的电子束可以将材料加热到很高的温度，可熔炼钨、钼、钽、铌等高熔点金属。

3）电子束熔炼时的参量可以精确控制，电子束轰击的位置也可以准确控制，熔炼温度和熔化维持时间很容易控制。

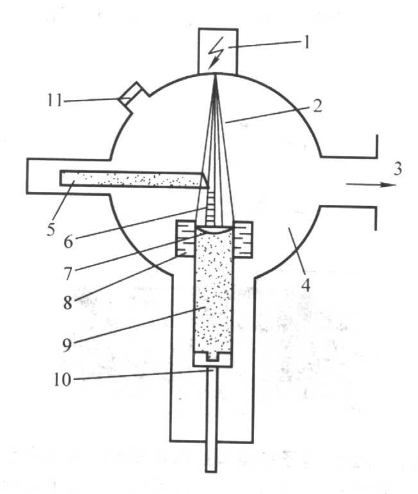


图 6.13-20　电子束熔炼示意图
1—电子枪；2—电子束；3—至真空泵；4—真空室；5—原料锭；6—熔滴；7—熔池；8—铸锭；9—结晶器；10—拉锭器；11—观察窗

4）熔炼时用水冷坩埚，材料不会和坩埚发生反应，能够保证产品的精确成分或高纯度。

5）熔炼时的真空度高，有利于材料的充分除气。

4.2　电子束熔覆快速制造技术

4.2.1　定义

在电子束熔炼技术与快速原形技术的基础上发展起来的一种快速制造技术，与激光熔覆快速制造技术类似，也是由 CAD 产生零件模型，并用分层切片软件对其进行处理，获得各截面形状的信息参数，作为电子束偏转的轨迹参数。工作台在计算机的控制下，根据几何形体各层截面的坐标数据进行移动的同时，用电子束熔炼的方法将送到指定位置的粉末或线材进行熔化，逐层堆积，最终形成具有一定外形的三维实体零件。

美国麻省理工学院和美国 NASA Langley 研究中心，John Edward Matz 提出的电子束实体自由制造（electron beam solid freeform fabrication，EBSFF）、NASA 的 EBF（electron beam free-form fabrication）与激光熔覆较为类似，电子束实时熔化从侧向送给的金属丝，形成熔滴；工作台移动，使熔化的金属沉积在基体上，堆积形成零件。

图 6.13-21 为美国 MIT 学院的 John Edward Matz 采用电子束熔覆丝材的快速制造技术示意图，图 6.13-22 为日本大阪大学焊接工艺研究所采用电子束熔覆粉末进行表面改性的示意图。

4.2.2　特点

电子束熔覆快速制造技术除了具有激光熔覆快速制造

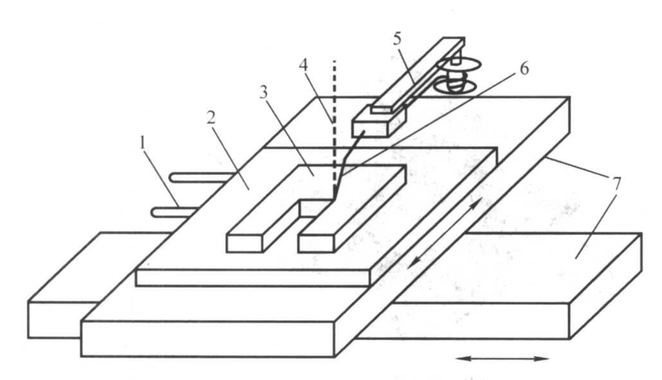


图 6.13-21 电子束熔覆丝材快速制造技术原理示意图

1—冷却水进出口；2—基板；3—工件；4—电子束；
5—送丝装置；6—丝材；7—*X*－*Y* 工作台

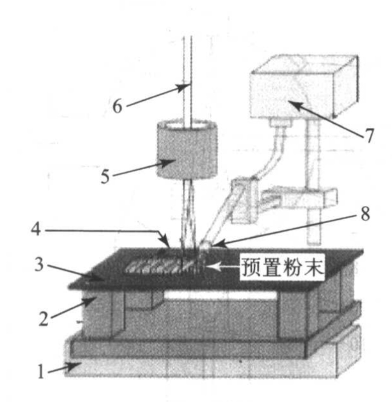


图 6.13-22 电子束熔覆粉末表面改性技术示意图

1—工作台；2—立柱；3—低碳钢；4—电子束偏转；
5—偏转线圈；6—电子束；7—供粉箱；8—送粉头

技术的特点外，还具有激光不能比拟的高的能量利用率，但定位精度没有激光高，而且在设备成本方面的优势只体现在大功率的电子束加工设备。

美国 MIT 学院开发的电子束熔覆快速制造技术又称为电子束实体自由制造技术 EBSFF（electron beam solid freeform fabrication），与其他实体自由制造方法类似，电子束实体自由制造也是一层一层地堆积而成，但处理的对象不是金属粉末，而是金属丝；采用的使能是电子束而不是激光。采用丝材作为成形材料的好处之一是通过数控工作台提供的丝材比喷射出的金属粉末容易控制，另一个好处是可以减少材料内部较大体积夹杂的存在，因为存在夹杂的丝材原料在拉丝时容易断裂，从而间接保证了电子束实体自由制造时成形零件中夹杂的数量减少、尺寸减小，制造零件的内部品质得到了保证。

4.2.3 电子束熔覆快速制造设备

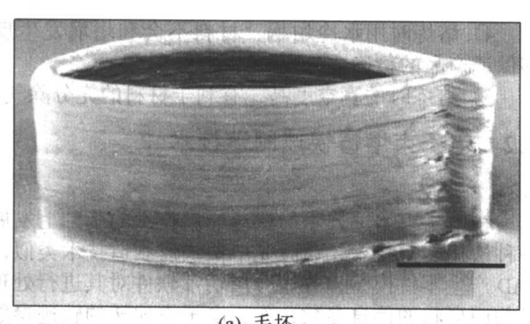
EBSFF 设备主要包括：电子枪、真空系统、高压电源系统、聚焦线圈、工作室、*X*－*Y* 平面的数控工作台、送丝机构，安装在工作台上的零件冷却系统及控制计算机。

4.2.4 电子束熔覆快速制造技术应用

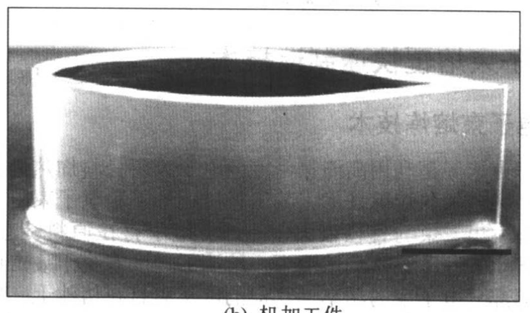
John Edward Matz 博士采用该技术在一个安装在旋转轴的基准上制做了涡轮盘，丝材为 718 合金。结果表明：定位精度优于喷射成形，但比 3DP 和 SLS 工艺差，表面质量不高，还需进行锻造和（或）机加工。

图 6.13-23 为美国 NASA Langley 研究中心采用与 EBSFF 类似的 EBF^3（electron beam freeform fabrication）技术制作的 2129 铝合金零件毛坯及机加工件。图 6.13-24 为不同形状零件的 EBF^3 快速制造，其中，(a) 采用较高的沉积速率 1 300 cm^3/h；(b) 为扫描方向突然改变的零件成形；(c) 为具有复杂曲率的零件成形；(d) 为没有支撑的悬臂件成形；(e) 为几何形状发生改变的零件成形。

此外，需要指出的是由于 EBSFF 技术制造的零件毛坯十分接近设计尺寸，锻造时可以采用单模成形工艺，也不需要很大的锻造压力，从而可以延长模具的使用寿命。

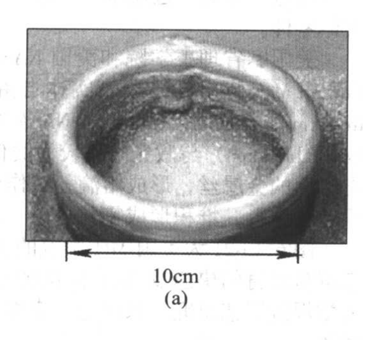


(a) 毛坯

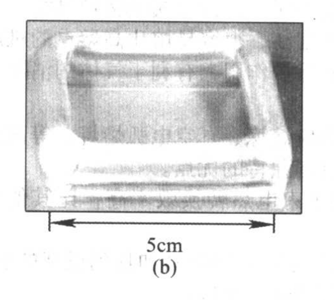


(b) 机加工件

图 6.13-23 采用 EBF^3 制作的 2219Al 合金机翼螺旋桨架毛坯及机加工件



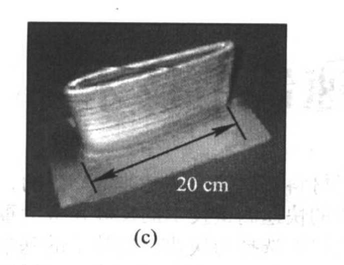
10cm
(a)



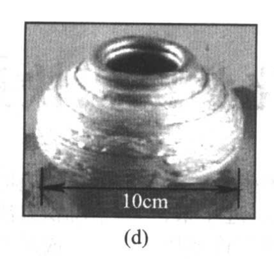
5cm
(b)

图 6.13-24 不同形状零件的 EBF^3 快速制造

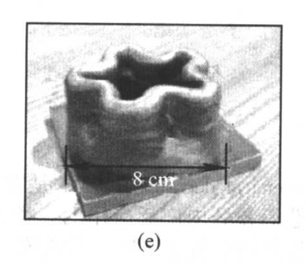




(c)



(d)



(e)

续图 6.13-24

编写：齐海波（清华大学）



第 14 章　化学沉积快速制造技术

化学沉积（chemical deposition）技术是在薄膜生长、表面工程、微细制造等领域内广泛应用的一类方法。近年来，化学沉积技术被逐渐用于快速制造技术领域，促成了许多快速制造新工艺的涌现。

基于化学沉积方法的快速制造技术有许多种，根据成形材料的不同状态，这些快速制造工艺可以分为化学气相沉积成形（Rapid Prototyping of Chemical Vapor Deposition，CVD－RP）和化学液相沉积成形（Rapid Prototyping of Chemical Liquid Deposition，CLD－RP）两大类；而根据使能技术的不同方式，这些快速制造工艺又可以分为激光诱导化学沉积成形（rapid prototyping of laser－induced chemical deposition）、电子束诱导化学沉积成形（rapid prototyping of electron－induced chemical deposition）、电化学沉积成形（rapid prototyping of electrochemical deposition）和热化学沉积成形（rapid prototyping of thermochemical deposition）等。

选择不同状态的成形材料和不同方式的使能技术集成在一起，就形成了多种基于化学沉积方法的快速制造新工艺。本章将主要介绍基于热化学沉积方法的快速制造技术和几种典型的采用其他化学沉积方法的快速制造技术。

1　基于热化学沉积方法的快速制造技术

1.1　基于热化学沉积方法的快速制造技术的基本原理

作为众多的快速制造新技术中的一种，基于热化学沉积方法的快速制造技术的基本原理如图 6.14-1 所示：在特定的成形环境中，将室温下为液态的成形材料用数字化喷射的方法喷射到加热的底板上，成形材料的液滴与底板接触后，于特定的条件下发生热化学反应，得到固体产物并沉积在底板上。通过控制喷射装置的运动和成形材料液滴的喷射，就可以将某种材料的三维实体逐层堆积成形，最终得到所需的原型零件。

基于热化学沉积方法的快速制造技术是一种采用喷射技术的快速制造工艺，有利于实现材料的离散－堆积过程。通过改变喷射装置出口喷嘴的直径，就可以改变成形材料微滴的大小，最终控制成形的精度。根据不同的成形材料的性质，改变成形条件和基本工艺参数，从而控制成形的工艺过程。

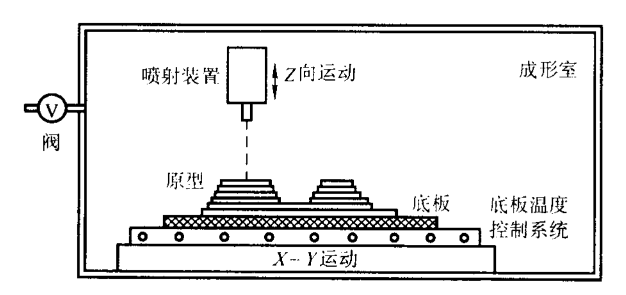


图 6.14-1　基于热化学沉积方法的快速制造技术原理示意图

1.2　适用于热化学沉积方法的快速制造技术的成形材料

成形材料是快速制造技术的核心之一，选择何种物质作为成形材料是热化学沉积需要考虑的首要问题。可供热化学沉积的成形材料从原理上讲是非常广泛的，这对于基于热化学沉积方法的快速制造技术的发展是极为重要的。

成形材料的选择与快速制造技术的基本原理和工艺过程及材料的物理、化学性质密切相关。根据所要得到的由某种物质构成的原型零件，考虑选择何种相应的物质作为成形材料。选定的成形材料应该满足以下特性：

1）在常温、常压下为液态，具有适当的黏度和流动性，能够符合喷射技术的要求；

2）在一定条件下能够发生热化学反应；

3）成形材料经热化学反应后的产物除了单一的、固态的纯净物外，其余的只能是气体或是其他具有易挥发、易升华等特性的物质。

成形材料的上述特性，保证了最终沉积得到的是某种单一物质成分的金属或非金属原型零件。

研究发现，要得到金属材料构成的原型零件，满足基于热化学沉积方法的快速制造技术的工艺要求的成形材料，主要是属于金属有机化合物这一大类的材料。其中，比较典型的如$Fe(CO)_5$（五羰基合金铁）、$Ni(CO)_4$（四羰基合金镍）。在常温、常压下$Fe(CO)_5$为淡黄色油状液体，密度为 1.46 g/cm^3，熔点－20.5℃，沸点 104℃，不溶于水，溶于乙醇、乙醚、丙酮、苯、四氯化碳、二硫化碳等。其在 200℃、15～100 kPa 的条件下可发生如下反应：

$$Fe(CO)_5 \longrightarrow Fe + 5CO$$

实际上，这一反应过程是通过三个反应步骤来实现的：

$$Fe(CO)_5 \longrightarrow Fe(CO)_4 + CO$$
$$Fe(CO)_4 \longrightarrow Fe(CO)_3 + CO$$
$$Fe(CO)_3 \longrightarrow Fe + 3CO$$

与$Fe(CO)_5$类似，在常温、常压下$Ni(CO)_4$为无色或黄色易挥发液体，密度为 1.31 g/cm^3，熔点－19.3℃，沸点 42.2℃，难溶于水，溶于乙醇、乙醚、丙酮、苯、四氯化碳等。其在 200℃、15～100 kPa 的条件下可发生如下反应：

$$Ni(CO)_4 \longrightarrow Ni + 4CO$$

上述反应过程也是通过两个反应步骤来实现的：

$$Ni(CO)_4 \longrightarrow Ni(CO)_3 + CO$$
$$Ni(CO)_3 \longrightarrow Ni + 3CO$$

在研究中发现，除了可以通过某些金属有机化合物作为成形材料，得到金属材料的原型外，还有许多其他种类的材料也符合基于热化学沉积方法的快速制造技术的工艺要求，能够作为成形材料，并得到由无机盐、陶瓷材料、特殊性能的功能材料等物质构成的原型零件。

大多数可溶于水的无机盐类的成形材料都能在一定条件下，沉积得到由其自身材料构成的原型零件。例如，NaCl 的水溶液在 110～130℃、100 kPa 的条件下，可沉积得到由 NaCl 构成的原型零件；$NiSO_4$ 的水溶液在 80～95℃、100 kPa 的条件下，可沉积得到成分为 $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ 的原型零件。

许多金属有机化合物和有机酸类的成形材料能够在一定条件下，沉积得到由金属氧化物或陶瓷材料构成的原型零件。例如，$C_{15}H_{21}O_6Al$（乙酰丙酮铝）的甲苯溶液在 125～300℃、100 kPa 的条件下，可沉积得到由 Al_2O_3 构成的原型零件；过饱和的 H_2SiF_6（六氟硅酸）水溶液，在 50～70℃、100 kPa 的条件下，可以沉积出成分为 SiO_2 的原型零件。

某些有机物在特定的条件下将表现出一些特殊的物理、化学性质，能够沉积得到某些特殊结构或性能的原型零件。



例如，C_6H_6（苯）的水溶液在 150～250℃、100 kPa 的条件下，可以沉积得到 DLC（diamond－like carbon），等。

综上所述，不难发现有多种材料符合基于热化学沉积方法的快速制造技术的工艺要求，能够作为成形材料并得到由金属、无机盐、陶瓷材料、功能材料等等众多物质构成的原型零件。正是基于热化学沉积方法的快速制造技术的这一显著特点，将为其带来广阔的应用前景。

1.3　基于热化学沉积方法的快速制造技术的特点

快速制造技术发展到今天，已经不再仅仅限于制作原型零件，直接生产出实际零件和产品，特别是金属零件、功能器件等，逐渐成为快速制造技术发展的一个重点，它在快速制造技术的应用领域中所占的比重也逐年上升。近年来，快速制造技术自身的发展重心，也呈现出了从激光类的快速制造技术向微滴喷射类的快速制造技术转移的趋势。

与其他的快速制造技术相比，基于热化学沉积方法的快速制造技术具有一些明显的特点。

1）该方法是一种直接制作出原型零件的工艺，可以省略许多中间步骤，不仅使工艺过程的耗时大为缩短，而且不存在模型复制而造成的精度误差。

2）在该方法中，可以采用内径很小的喷嘴，并保持底板的温度均匀、恒定，从而得到结构细致、精度高的原型零件。

3）该方法不需要使用激光器等大功率器件，设备成本和运行成本均大大降低。

4）在该方法中只需要对底板加热，不需要使用任何黏结剂，原型零件较为致密，整个系统也更简单，且易于控制。

5）在该方法中，不需要使用高温加热的喷头，在成形金属原型零件时，避免了直接使用金属作为成形材料而需要加热熔化再到冷却凝固的过程，能够在低于金属熔点的温度下制作出金属原型。

6）与采用气态成形材料的快速制造工艺相比，在该方法中，成型室的形状、尺寸不再影响反应速度，可以达到更快的沉积速率。

7）该方法是基于热化学反应的工艺，可供选择的成形材料范围广泛。选择合适的成形材料，不仅可以沉积得到金属材料的原型零件，还可以沉积成形由众多非金属材料及化合物构成的原型零件。

尽管与其他快速制造工艺相比，基于热化学沉积方法的快速制造技术有上述一些明显的技术优势，但任何一项新技术都是在一定的背景下产生的，这也决定了其在某些领域内表现出良好的应用优势。基于热化学沉积方法的快速制造技术也面临一些局限和挑战，这主要表现在以下两点。

1）从目前的研究现状来看，受沉积速率的限制，基于热化学沉积方法的快速制造技术尚不具备制作大尺寸原型零件的优势。

2）对于某些成形材料而言，沉积出的原型零件还需要进一步的后处理，以降低其残余应力或是提高其强度、硬度。

综上所述，基于热化学沉积方法的快速制造技术是一项新的可直接获得多种材料的原型零件的快速制造方法，是快速制造技术的又一个发展。它在一定程度上克服了现有的快速制造工艺的一些缺点和局限，具有较明显的技术优势，它的应用范围无疑是非常广泛的，将会为快速制造技术的发展开辟新的道路并产生较大的影响。

1.4　基于热化学沉积方法的快速制造系统

如前所述，基于热化学沉积方法的快速制造技术的基本原理为：在特定的成形环境中，将室温下为液态的成形材料用数字化喷射的方法喷射到加热的底板上，成形材料的液滴与底板接触后，于特定的条件下发生热化学反应，得到固体产物并沉积在底板上。通过控制喷射装置的运动和成形材料液滴的喷射，就可以将某种材料的三维实体逐层堆积成形，最终得到所需的原型零件。该技术的上述基本原理同时也决定了该技术的基本工艺过程。建立合适的、符合技术原理和工艺过程要求的成形系统，是完整实现整个工艺过程的基础和保证。

1.4.1　成形系统的总体结构与功能分析

为了实现基于热化学沉积方法的快速制造技术的上述工艺过程，根据该技术的基本原理及其工艺过程的要求，并参照通常的快速制造系统，用于本工艺的快速制造系统由 5 个子系统组成。

1）数据处理系统　输入原型零件的 STL 文件数据，进行数据的检验、修正、分层、加支撑和网格填充等处理，生成分层文件（.SLI，.CLI）和网格填充文件（.NET）。

2）控制运动系统　读入原型零件的分层文件和网格填充文件，系统控制软件根据工艺要求产生控制指令和扫描运动指令，在指令的控制下驱动系统驱动喷头、运动机构等完成规定的操作。

3）机构本体　在控制信息的作用下，作为工艺过程的执行机构，完成总功能所要求的动作，实现扫描与材料的堆积。

4）成形环境　为保证热化学反应的顺利进行，通过特制的成形室提供可控的成型环境，包括加热底板的温度控制、成形室的气氛与压力控制、气体产物的回收与处理等。

5）材料输送和喷射系统　系统中成形材料的传输通道以及喷射执行单元，确保成形材料安全、可靠、精确地堆积起来。

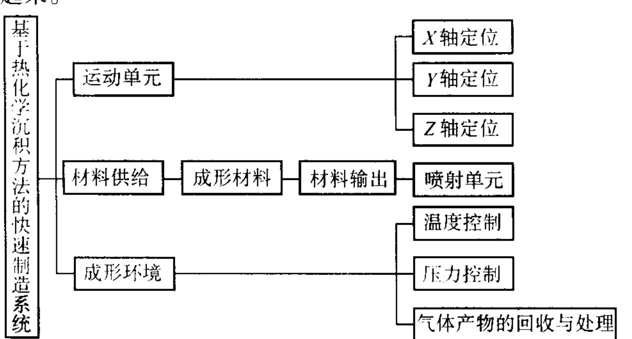


图 6.14-2　成形系统的功能组成

根据基于热化学沉积方法的快速制造技术的基本原理和工艺过程，用于本工艺的快速制造系统的全部功能可分解为图 6.14-2 所示。成形系统主要包括硬件和软件两部分。

1.4.2　成形系统的硬件组成

成形系统的硬件部分主要由 6 个子系统构成，如图 6.14-3 所示为系统的原理示意图，系统的外观见图 6.14-4。

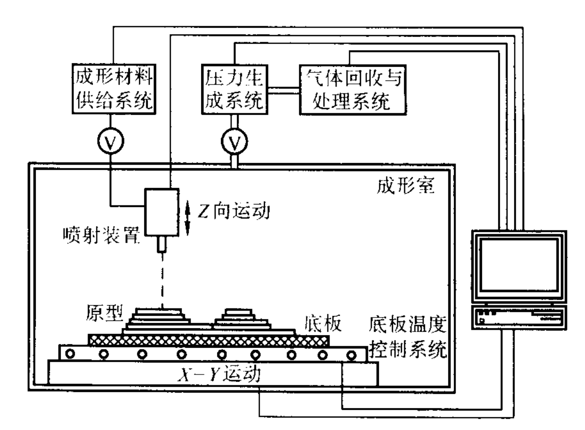


图 6.14-3　成形系统的原理示意图

1）运动系统　综合考虑系统的 X、Y、Z 轴的行程、承载重量、定位精度、运动形式，采用圆柱形导轨－滚珠丝杠－步进电机的结构形式。

基本参数如下：成形空间为 100 mm × 100 mm × 50 mm；最大扫描速度为 20 mm/s；重复定位精度小于 0.005 mm；最大承载为 15 kg。

考虑到系统的运动行程小、承载较轻，以及扫描速度不高、振动小的特点，并兼顾制造成本，机构本体采用装配连接框架结构。

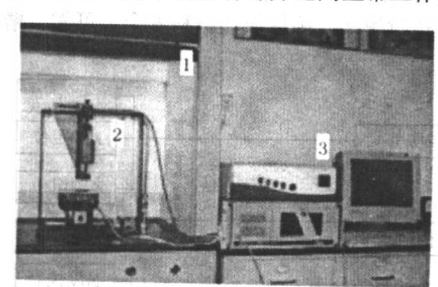
2）底板温度控制系统　加热底板是原型零件沉积的位置，也是热化学反应发生的地方。加热底板采用电阻丝加热的方式，达到成形材料发生热化学反应所需的温度，并通过温控单元进行控制。

3）成形材料供给系统　参照其他喷射类快速制造工艺的经验，根据不同成形材料的密度和黏度，可选择机械开断、离散喷射等类型的喷射装置。

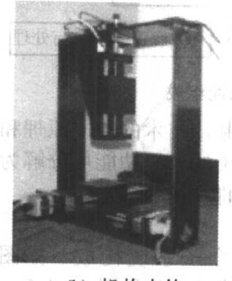
4）成型室　成型室提供成形材料发生热化学反应的成形环境。根据不同的成形材料，在成型室内产生不同的压力、气氛，以符合发生热化学反应的反应条件。

5）气体产物的回收与处理　在热化学反应进行的过程中，随时将产生的气体产物从成形室中抽出。抽出的气体经处理后排出。

6）工控机单元　完成数据处理并根据指令控制运动系统的动作，以及协调整个系统各部分之间正常工作。



(a) 成形系统的全貌


(b) 机构本体

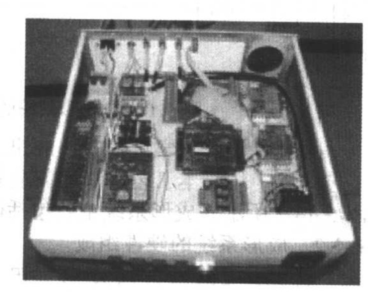

(c) 控制柜

图 6.14-4　成形系统的外观

1—成形室；2—机构本体；3—工控主机及控制柜

1.4.3　成形系统的软件组成

用于本工艺的快速制造系统的软件部分包括系统控制软件、CAD 造型软件、分层软件、数据处理软件等。在通用的快速制造软件的基础上，根据基于热化学沉积方法的快速制造技术的特点进行了修改和重新设计。

1.4.4　成形系统的控制系统

根据 1.4.1 节中对本工艺所用的快速制造系统的功能分析，可以得出控制系统的 6 个时域参数：

1）DP_1：X 轴定位；

2）DP_2：Y 轴定位；

3）DP_3：Z 轴定位；

4）DP_4：喷射装置控制；

5）DP_5：底板温度控制；

6）DP_6：抽气泵控制。

在控制系统中，需要对上述 6 个时域参数进行控制，至少应该有 6 个独立的控制输出及相应的控制输入。控制系统的功能需求如图 6.14-5 所示。

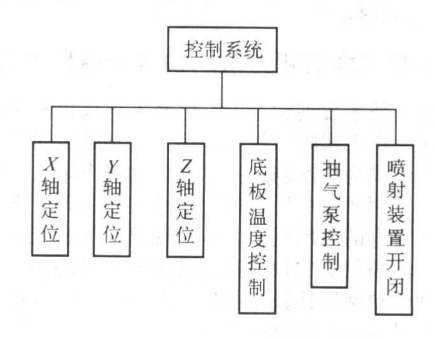


图 6.14-5　控制系统的功能需求

根据控制系统的功能需求，用于本工艺的快速制造系统的控制系统包括以下几个主要部分。

1）数控系统　数控系统选用 PMAC 多轴控制卡。该部分主要控制运动系统执行各个工艺动作。

2）温度控制系统　温度控制系统中主要控制器选用 FUJI 温控表，具有温度自主调节功能，控制系统中的加热元件。

3）压力控制系统　压力控制系统由成形室、压力表、抽气泵和压力传感器等组成，控制成形室内的环境（压力、气氛），以符合发生热化学反应的反应条件。

4）I/O 系统　主要由 I/O 卡和继电器组成。I/O 接口板具有 16 路输入/输出接口，输出开关量用于继电器控制。I/O 系统主要控制温度控制系统和压力控制系统的选通。

整个快速制造系统的控制采用分布式控制系统，且为两级控制，即工控机主机集中统一协调控制，数控系统、温度控制系统和压力控制系统自主控制，分系统通过插接板直接插入主机扩展槽或通过通讯接口与主机相连，控制命令及数据通过 PC－BUS 和 RS－232 串行口传输。整个系统的控制结构如图 6.14-6 所示。

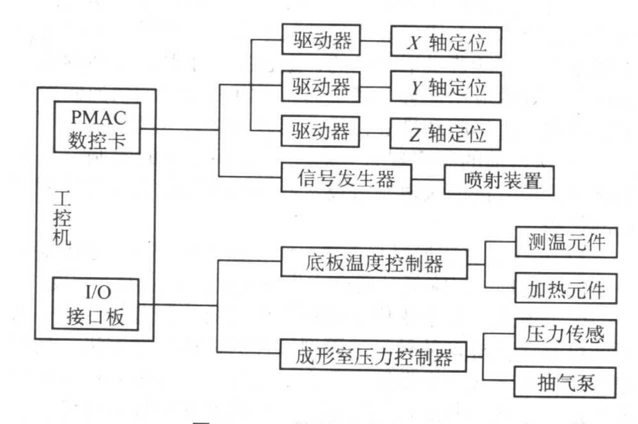


图 6.14-6　控制系统的结构图

在控制系统中，工控机通过数控系统对三轴驱动电机进行控制，并控制喷射装置喷射成形材料。温度控制系统和压力控制系统由工控机 I/O 口发出的信号进行转换和控制。

控制系统采用这种结构，可以直接利用 PC 插槽和通讯接口，近似于以并行方式进行控制，因此，工控主机的资源能够充分利用，系统集成度高、运行速度快；各个分系统可



以利用现成的先进设备，运行更可靠，可以更好地实现系统集成，并使系统达到最优的总体性能。

基于控制系统的上述结构，用于本工艺的快速制造系统的控制软件，在基本工艺参数的选择、几何信息处理、工艺流程规划、NC 代码自动生成等方面根据基于热化学沉积方法的快速制造工艺的工艺特点进行了新的设计和修改，以实现本工艺的整个工艺过程。同时，根据本工艺的工艺特点和工艺参数的要求，也对 CAD 造型软件、分层软件、数据处理软件等进行了相应的设计和修改。

1.5　热化学沉积成形原理

在基于热化学沉积方法的快速制造工艺中，热化学反应能否顺利地、可控地进行是实现工艺过程的关键。成形材料的物理、化学性质在工艺过程中扮演着决定性的角色，对整个工艺过程都会产生贯穿始终的影响。

成形材料的液滴在底板上发生热化学沉积的过程，可描述为如图 6.14-7 所示。

1）物理吸附　由大量分子组成的成形材料的液滴，从喷射装置喷射出以后，将与保持一定温度的底板相接触，并在其上发生物理吸附过程。这近似于在底板表面与液滴中的分子之间形成了一种弱的相互作用。物理吸附是沉积并成形的前提。

沉积过程中，成形材料的液滴在沉积底板上的飞溅现象会破坏物理吸附的发生，但适当的底板温度会保证飞溅现象被控制在合理的程度之内。

2）化学吸附　即液滴中分子间的相互作用被打破，新的化学键将在液滴分子与底板表面之间形成。在化学吸附过程中，喷射到底板上的液滴分子一般会具备良好的活性并进一步发生热化学反应，相应的产物的微粒随之沉积出来，如金属单质原子、金属氧化物分子等。

3）迁移与聚集　在发生热化学沉积的温度下，生成的产物的微粒通常具有较高的扩散系数，并能够在底板表面发生“迁移”，直到与其他已沉积出的部分相聚集，从而获得更高的热动力学稳定性。这种“迁移”过程最终形成了一层新的沉积层。

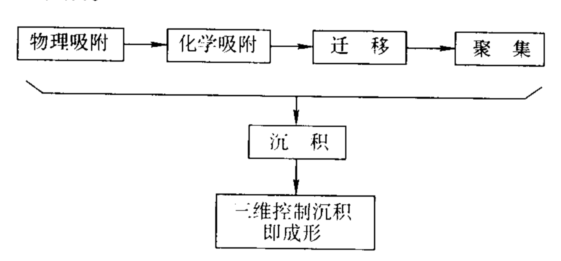


图 6.14-7　热化学沉积成形的原理

在基于热化学沉积方法的快速制造工艺中，能否获得较高的沉积速率，是这一工艺能否获得更广泛应用的关键。将沉积速率定义为，单位时间内新生成的沉积产物的厚度。沉积速率可以表示为如式（6.14-1）所示：

$$v = K\frac{c\rho_1 q}{\rho_s A} \tag{6.14-1}$$

式中，v 为沉积速率；K 为沉积系数；c 为室温下液态成形材料的浓度；ρ_1 为室温下液态成形材料的密度；q 为喷射装置喷射液态成形材料的流量；ρ_s 为固态沉积产物的密度；A 为沉积区域的面积。

从式（6.14-1）可以得出，通过增大液态成形材料的浓度，或者在保证热化学反应充分进行的前提下，增大喷射装置喷射成形材料的流量，可以获得更高的沉积速率。

以选用 20% 的 NaCl 溶液，在喷射频率为 10 Hz 的条件下，沉积出 0.5 mm 宽、20 mm 长的直线为例，K 为 1，可得沉积速率约为 2 mm/min。

1.6　影响工艺过程的主要参数

研究发现，在基于热化学沉积方法的快速制造工艺中，影响工艺过程的主要参数有底板温度、成形环境压力、液滴尺寸、喷射速度、喷射频率等。其中，对成形过程影响最大的工艺参数是底板温度和成形材料的液滴尺寸。

1.6.1　底板温度

底板温度和成形环境压力主要由成形材料本身的物理、化学性质决定。底板温度是成形过程中最重要的工艺参数，只有控制在适当的范围内，才能实现热化学反应生成物的可控和有序的堆积。

如图 6.14-8 所示，当成形材料的一个液滴从喷射装置喷射到底板上以后，如果底板的温度过高（图 6.14-8a），则液滴底部与底板接触的部分迅速蒸发，体积急剧膨胀，这将使整个液滴迅速“爆沸”，而无法实现沉积过程；如果底板的温度过低（图 6.14-8b），则液滴能够在底板上充分流动，在液滴内与底板接触的面积上方形成一个气体薄层，此时，固体生成物将沉积在底板上，但由于液滴在底板上的充分流动，而无法得到具有预期形状的原型。

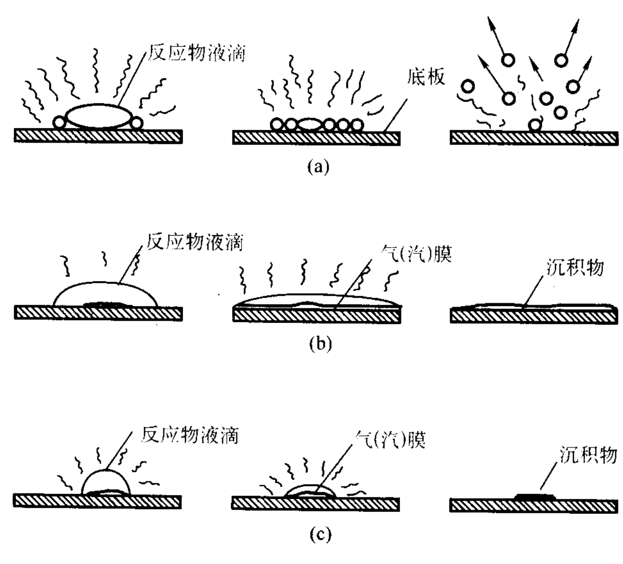


图 6.14-8　底板温度对工艺过程的影响

只有底板的温度合适（图 6.14-8c），则液滴在完全蒸发前没有足够的时间流动，并在液滴内与底板接触的面积上方形成一个气体薄层，液滴就会在底板上预期的位置发生热化学反应，沉积出形状规则的固体产物，从而实现工艺要求。

底板的温度是否合适，在根本上是由成形材料本身的性质决定的，同时也要根据液滴大小、喷射距离等工艺参数在一定范围内适当调整。

1.6.2　液滴尺寸

成形材料的液滴从喷射装置中喷射出来以后，液滴的尺寸大小将对其到达底板并发生热化学反应的过程产生重要的影响，如图 6.14-9 所示。

如果液滴的尺寸过小，在底板的温度足够高的情况下，在液滴与底板相接触以前，液滴中的成形材料就有可能部分甚至全部发生了热化学反应，生成了中间产物或是最终的固态沉积产物。这会造成沉积出的原型致密度的降低和粗糙度的增大。如果液滴的尺寸过大，则液滴在底板上覆盖的面积过大，需要更长的时间使热化学反应充分进行。这将导致沉积出的原型精度降低。

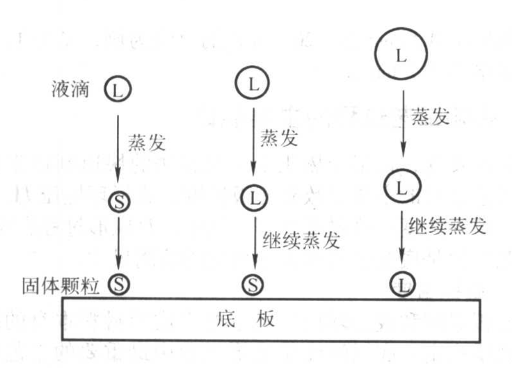


图 6.14-9　液滴尺寸对工艺过程的影响

合适的液滴尺寸，将保证液滴与底板接触后发生热化学反应的时机和程度恰到好处。而这与喷射距离即喷射装置出口与底板之间的距离和底板温度等工艺参数也密切相关。

1.6.3　喷射速度和喷射频率

喷射速度是指液滴在喷射过程中与底板相接触时刻的速度，它取决于喷射距离以及成形材料所受的压力。喷射距离越长，喷射速度越大，成形材料所受的压力越大，喷射速度也越大。喷射速度越大，则液滴在与底板接触时的溅射作用越强，液滴在底板上覆盖的区域越大，有利于固体生成物的迅速沉积，但由于液滴覆盖面积增大，成形的精度将变低，成形过程的可控性降低。

喷射频率是指单位时间内喷射出的液滴数目。喷射频率要与热化学反应的速度相适应，即喷射频率要与其他工艺参数相匹配，以保证有足够而适量的液滴在底板上发生热化学反应。喷射频率将影响工艺过程的成形效率。

综上所述，在基于热化学沉积方法的快速制造工艺中，上述各项参数都会对工艺过程及其他工艺参数产生影响。成形材料的物理、化学性质从根本上决定了各项工艺参数的选取。只有根据不同成形材料的特性，确定各工艺参数的合适范围并彼此协调匹配，才能顺利实现工艺过程，并保证制作得到所需的原型零件。

1.7　成形材料与工艺参数之间的合理匹配

如 14.1.2 节中所述，有许多种材料适用于基于热化学沉积方法的快速制造技术，能够作为成形材料制作出不同的原型零件，成形过程中的主要工艺参数在上节中进行了分析。根据不同种类的成形材料来确定与之相应的优化工艺参数，一些有代表性的成形材料及其沉积产物与主要工艺参数如表 6.14-1 所示。

表 6.14-1　几种成形材料及其沉积产物与主要工艺参数

成形材料	成形材料浓度	沉积产物	底板温度/℃	成形环境压力/kPa	沉积速度/$mm\cdot min^{-1}$
NaCl 溶液	20%	NaCl	110 ~ 120	100	1 ~ 5
$C_{15}H_{21}O_6Al$ 溶液	120 g/L	Al_2O_3	125 ~ 300	100	0.1 ~ 0.2
$C_6H_6 + H_2O$		DLC	150 ~ 250	10 ~ 150	0.001 ~ 0.01
金属有机铜盐溶液	11%	Cu	200 ~ 250	100	0.001 ~ 0.01
金属有机镍盐溶液	4%	Ni	180 ~ 230	100	0.001 ~ 0.01

1.8　基于热化学沉积方法的快速制造工艺试验

清华大学机械工程系激光快速成形中心选择不同的成形材料，在不同材质的基底上沉积出了由不同材料构成的原型，如图 6.14-10 ~ 图 6.14-14 所示。

成形条件为：

实验设备：基于热化学沉积方法的专用快速制造系统

沉积基底：铜　25 mm × 25 mm × 12 mm

铝　25 mm × 25 mm × 8

玻璃　25 mm × 76 mm × 1.2 mm

喷射频率：2 ~ 10 Hz

喷嘴直径：80 ~ 150 μm

扫描速度：1 ~ 10 mm/s

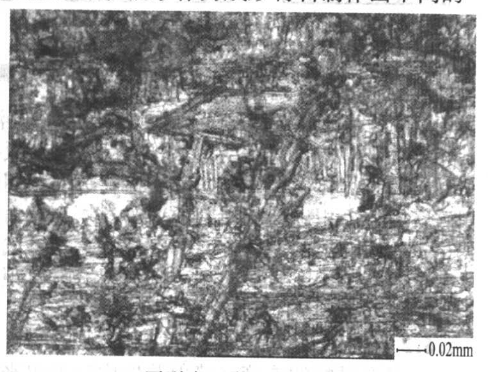
成形材料浓度：根据使用的成形材料，选择其优化参数。

底板温度：根据使用的成形材料，选择其优化参数。

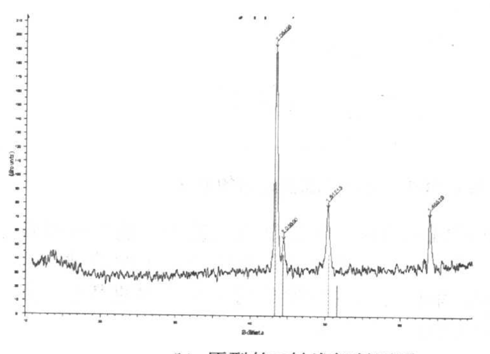
成形环境压力：根据使用的成形材料，选择其优化参数。

1.8.1　镍、铜金属单质的沉积

在铜基底上沉积出了镍单质，如图 6.14-10 所示；在铝基底上沉积出了铜单质，如图 6.14-11 所示。从图 6.14-10、图 6.14-11 中的 X 射线衍射图谱可以清晰地分辨出基底材料（分别为铜、铝）和沉积产物（分别为镍、铜）所对应的峰值。



(a) 原型表面微观形貌显微照片



(b) 原型的X射线衍射图谱

图 6.14-10　铜基底上沉积镍

1.8.2　镍、铜、无机盐原型的成形

分别在铝、玻璃基底上成形了镍的原型，如图 6.14-12、图 6.14-13 所示。

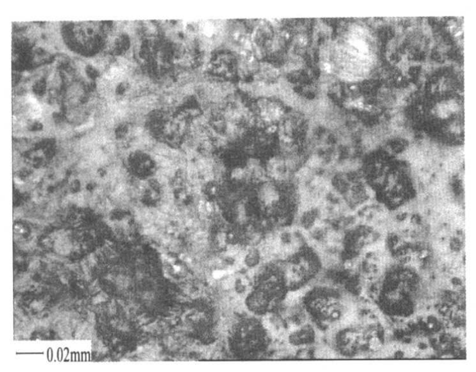
在玻璃基底上成形了铜的原型，如图 6.14-14 所示。从图 6.14-14 中的 X 射线衍射图谱可以看出，沉积产物中除了铜单质以外，也发现了一氧化铜。这是因为沉积出的铜单质在成形过程中，部分发生了氧化而造成的。

在铜基底上成形了铜的原型，如图 6.14-15 所示。

在铜基底上成形了无机盐的原型，如图 6.14-16 所示。

除图 6.14-16 所示的 Na_2SO_4 原型外，还选择相应的成形材料，沉积得到了 NaCl、$CaCl_2$、$MgCl_2$、$BaCl_2$、$CuSO_4$、$NiSO_4$、$FeSO_4$、Na_2HPO_4、NaH_2PO_4 等无机盐材料的原型。它们的工艺过程、沉积现象、表面形貌与图 6.14-16 所示近似。






(a) 原型表面微观形貌显微照片

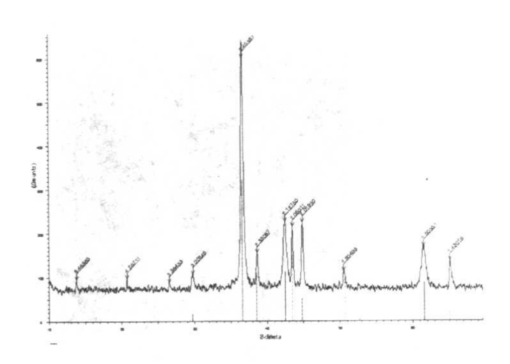

(b) 原型的X射线衍射图谱

图 6.14-11　铝基底上沉积铜

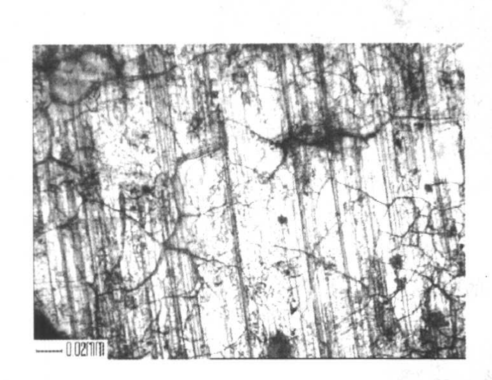


图 6.14-12　铝基底上成形的镍原型的表面微观形貌显微照片

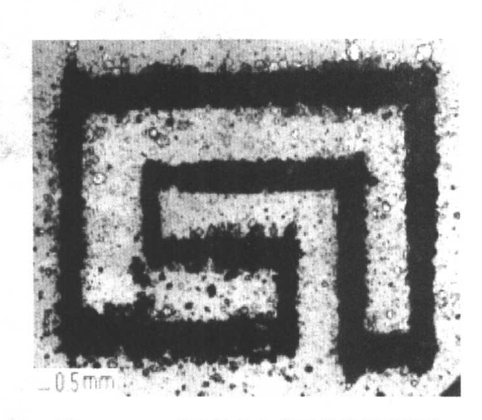
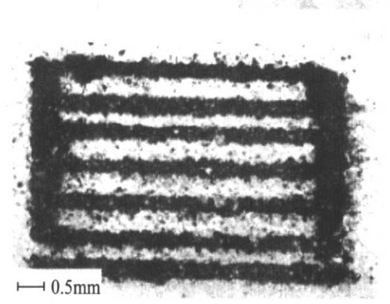
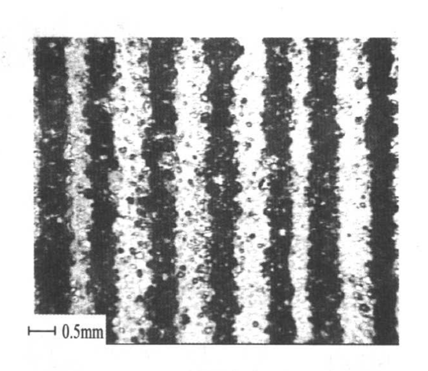


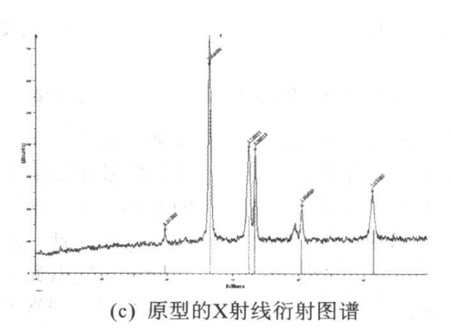
图 6.14-13　玻璃基底上成形的镍原型照片



(a) 原型照片



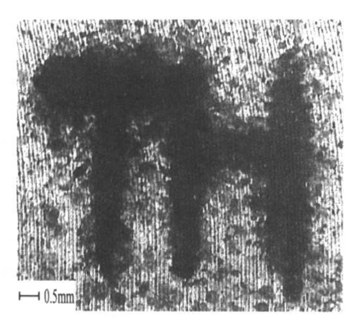
(b) 局部放大照片



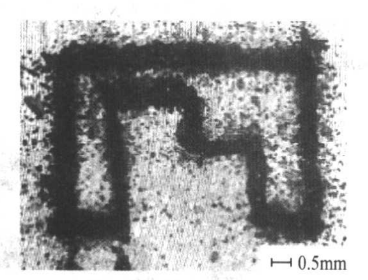
(c) 原型的X射线衍射图谱

图 6.14-14　玻璃基底上成形铜的原型

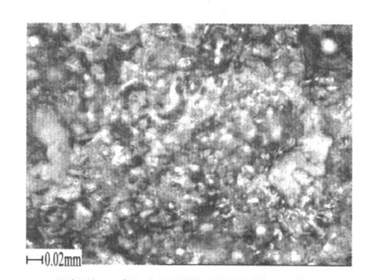




(a) 原形一照片

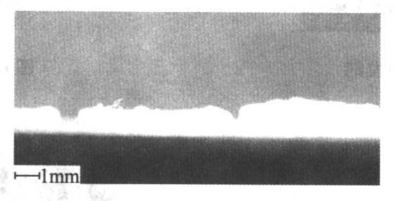


(b) 原形二照片

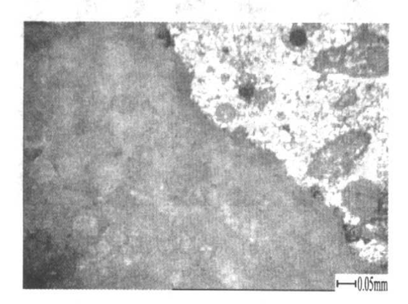


(c) 原形二的表面微观形貌显微照片

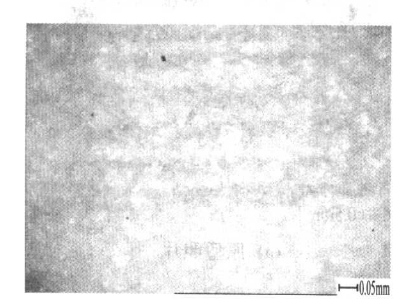
图 6.14-15 铜基底上成形铜的原型



(a) 原型的侧面照片



(b) 原型与底板交接处



(c) 原型表面微观的显微照片

图 6.14-16 铜基底上沉积的 Na_2SO_4 原型

研究中发现，不同的成形材料在工艺过程中表现出的成形能力具有显著的差异。沉积产物为无机盐、陶瓷及金属氧化物等的成形材料，发生热化学反应所需的温度较低，反应过程平缓，显示出较好的成形能力，可以在较大的范围内选择工艺参数。而沉积产物为金属的成形材料，发生热化学反应所需的温度高，反应过程剧烈，成形过程不易控制，工艺参数也被限定在较小的范围之内。

2 激光诱导气相化学沉积成形技术

激光诱导气相化学沉积成形技术（Rapid Prototyping of Laser - induced Chemical Vapor Deposition，LCVD - RP）是最早将气态成形材料用于快速制造技术来制作原型零件的工艺。这种工艺最早可以追溯到 1995 年，美国康涅狄格大学采用选择性激光烧结工艺在空气中烧结铝粉来制造由 Al_2O_3 构成的零件，并在氮气或氨气中烧结硅来制造成分为 Si_3N_4 的零件。与此同时，德国 MAX - Planck 研究所将原本用于制作薄膜的化学气相沉积方法应用到快速制造技术中，来制造三维实体零件。1998 年美国康涅狄格大学材料科学研究所的 Jakubenas、Marcus 和得克萨斯大学奥斯汀分校的 Sanchez 将这种方法作为一种新的快速制造工艺进行了深入研究，并命名为选择性激光沉积（Selective Area Laser Deposition，SALD）工艺。从此以后，有许多研究单位开始进行这种工艺的研究。

激光诱导气相化学沉积成形技术是一种基于活性气体分



解沉积的快速制造技术。它使用高能量激光束的热能和光能将活性气体分解，并沉积出一个层厚的材料薄层，逐层制造出实体零件，如图 6.14-17 所示。选择不同成分的活性气体，可以制造出不同材料的零件。影响成形工艺的主要参数是激光功率、成形温度（包括基体温度和成形材料的温度）、成形室内成形材料的压力等。

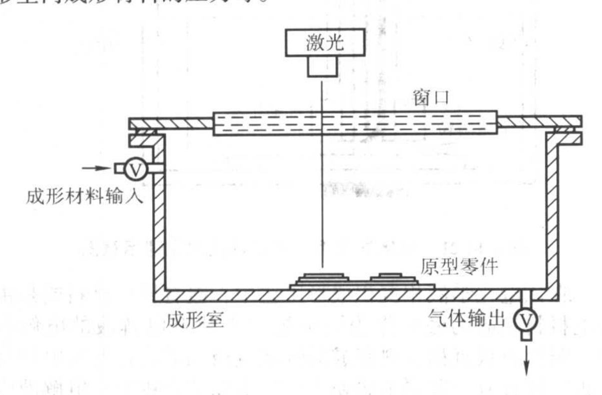


图 6.14-17　激光气相化学沉积成形技术原理示意图

激光诱导气相化学沉积成形技术采用气态的成形材料，主要是各种金属有机化合物。这类物质大部分在常温常压下为气态，少部分虽然是液态或固态，但往往又具有较低的熔点和较高的挥发性，极易气化。由于金属有机化合物所覆盖的材料范围极广，通常都具有热分解特性和氧化还原特性，因此，适用于激光诱导气相化学沉积成形技术的材料极为广泛，加之激光束具有极高的能量密度，这种方法能够在较低的温度下，将非金属、金属、金属化合物等许多材料沉积成形，如 C、Si、Fe、Ni、W、Mo、SiC、SnO_2、GaAs 等，特别是可以成形一些具有高熔点、超硬度等特殊性能的材料，如 Si_3N_4、TiC、TiN 等。

尽管如此，激光诱导气相化学沉积成形技术也存在一些局限。首先，这种工艺中需要使用大功率激光器和完备的真空系统，设备成本极高。其次，这种工艺在成形金属与合金材料时，成形性能受到很大的限制。这主要是受到沉积机理和激光特性的影响：①气态成形材料对激光的吸收率要小，而固态沉积产物对激光的反射率要小，否则，底板温度和沉积速率就会显著下降；②沉积出的材料的热导率要很低，否则，激光束的能量迅速扩散，在沉积表面上的高温区域将扩大，这会导致沉积速率的降低和零件精度的下降。由于金属和合金材料对激光具有较高的反射率和热导率，因此从以上两点可以看出，这种工艺虽然能够沉积出金属材料，但更适合于各类非金属和金属化合物，特别一些高熔点的难熔化合物，如 Ti 和 Si 的各类化合物。再次，这种工艺的沉积速率较低，基本维持在 0.1～1.0 μm/min 左右。

3　电子束诱导气相沉积成形技术

大多数采用化学气相沉积方法的快速制造技术，是以激光作为使能方式来进行研究的。除此以外，美国内布拉斯加－林肯大学机械工程系的 B.W. Robertson、化学和材料工程系的 Jiang Hong 等使用电极发射电子束作为使能方式，提出并研究了一种电子束诱导气相沉积成形技术（Rapid Prototyping of Electron Beam－induced Chemical Vapor Deposition，ECVD－RP）。

与激光诱导气相化学沉积成形技术不同的是，这种工艺通过电极发射出的电子束将活性气体分解，并沉积材料薄层，最终逐层制造出实体零件。工艺中虽然以电子束代替了激光器，但仍然需要配备完善的真空系统。

Jiang Hong 等研究者将一套场致发射扫描透射电子显微镜进行了改装，使其同时能够开展电子束气相沉积成形技术的研究，并选用二戊铁、二戊镍等无羰基的金属有机化合物作溪成形材料，沉积出了由 Fe、Ni 等材料构成的具有线、矩形、圆锥等简单几何形状的微米级、纳米级结构，如图 6.14-18 所示。

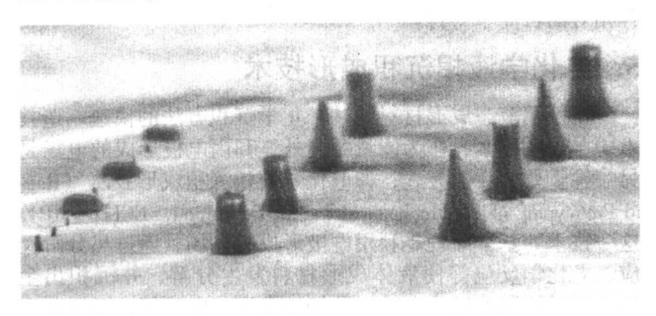


图 6.14-18　电子束诱导气相沉积成形技术制作出的原型

研究发现，在电子束诱导气相沉积成形工艺中，不同的成形条件将决定成形材料具有截然不同的成形机理，并导致完全不同的沉积结果。影响工艺过程的主要参数是基底温度和成形材料的压力。成形过程中，在某一基底温度下，成形材料的压力与它在该温度下的饱和蒸气压之间的比值，是决定成形机理和最终沉积结果的关键。

4　激光诱导液相化学沉积成形技术

在众多基于化学沉积方法的快速制造技术中，除了上述工艺采用气态的成形材料以外，还有一些工艺使用液态的成形材料。激光诱导液相化学沉积成形技术（Rapid Prototyping of Laser－induced Chemical Liquid Deposition，LCLD－RP）是其中较为典型的一种。激光诱导液相化学沉积成形技术的基本原理，是利用激光束使液态的成形材料发生光电化学反应、热电化学反应、光分解反应、热分解反应等，沉积出金属，并逐层得到三维实体零件，如图 6.14-19 所示。

这种工艺可以追溯到 20 世纪 80 年代，最初源于在材料表面镀敷金属的研究。1979 年 R.J. Von Gutfeld 等学者实现了 Au、Cu、Ni 等金属的局部镀敷。20 世纪 90 年代末，K. Kordas 等人对激光诱导液相化学沉积成形技术进行了较多的研究。国内的一些研究单位也在激光诱导液相化学沉积成形方面取得了一定的研究成果。复旦大学利用 Ar 离子激光器实现了在环氧树脂上沉积 Cu 及在 Si 片上沉积 Cu 和 Ni；华侨大学实现了在非金属材料表面激光诱导化学镀覆 Cu 和 Ni；华东理工大学采用醋酸铜溶液通过激光诱导的方法沉积出 Cu 线；上海交通大学采用硫酸铜溶液利用 CO_2 激光器在玻璃表面沉积出了 Cu，并对近一步进行三维微细加工的可行性进行了研究。

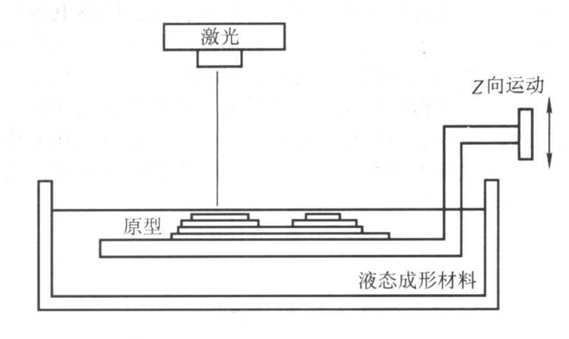


图 6.14-19　激光诱导液相化学沉积成形技术原理示意图

目前，激光诱导液相化学沉积成形技术主要应用于各种功能薄膜、微电子元件和线路的制造与修复中。这项工艺的

特点在于：①可以有选择地在零部件的局部进行微细的沉积；②不同于气相沉积成形，这项工艺主要用于沉积金属材料，而且可沉积的金属材料广泛，如 Cu、Au、Ag、Pb、Ni、Mo、Cr、Fe、Ti 等都可以沉积；③沉积速率高于气相沉积成形、化学镀等方法，可达 20 μm/min；④实验条件和工艺过程相对而言简单易行。

5　电化学液相沉积成形技术

在使用液态成形材料的基于化学沉积方法的快速制造技术中，除了以激光作为能量源之外，利用电极形成的电场是另一种重要的使能方式，即电化学液相沉积成形技术（Rapid Prototyping of Electrochemical Liquid Deposition，ECLD－RP）。这一技术的基本原理是利用电极形成的电场，通过热分解反应、电化学反应等使液体成形材料发生分解，并沉积出金属，通过控制电极的运动和电场的电压、电流等，逐层制造出需要的原型零件。

南京航空航天大学将喷射式电铸技术应用到快速制造技术领域，提出了选择性电铸工艺，即是一种电化学液相沉积技术。选择性电铸的工艺过程如图 6.14-20 所示，作为阳极的喷嘴将高速流动的电解液以一定的压力、速度喷射至阴极表面，电解液中的金属离子在外加电场的作用下被源源不断地沉积下来，通过控制喷嘴的扫描运动就能选择性地在特定区域沉积出零件的一个层面，逐层沉积叠加从而制作出三维实体原型零件。

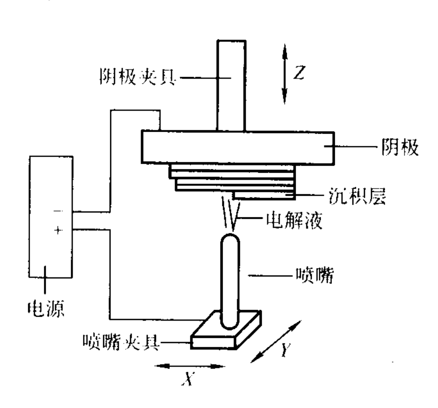


图 6.14-20　选择性电铸原理示意图

在选择性电铸工艺中，阴极上被喷嘴直接喷射到的位置会发生电铸过程，而电解液溅射到的其它地方由于电场强度很小就不会有电铸过程发生。为了避免电解液在原型零件表面堆积而影响成形过程的定域性，采用喷嘴向上喷射电解液进行沉积的方式。研究表明，这一工艺可以直接成形最终的金属原型零件，并能有效地降低传统电铸过程中的浓差极化，提高极限电流密度和铸层结构的致密度，改善电场分布的不均匀性和抑止氢气的析出。目前已经制作出了具有良好外形结构和纳米晶微观结构的 Cu 原型零件。

在电化学液相沉积成形技术领域，除了上述选择性电铸工艺之外，美国 Drexel 大学的 Zongyan He、Jack G. Zhou 等人对另一种电化学液相沉积成形工艺进行了初步研究，如图 6.14-21 所示。

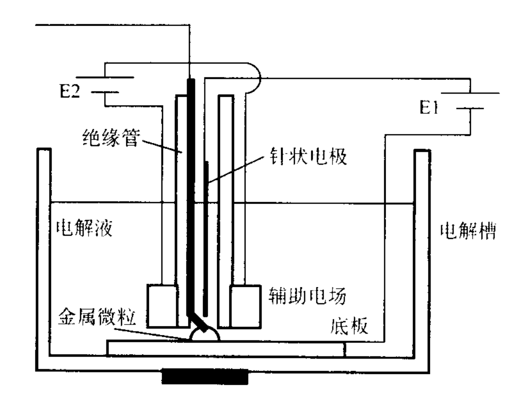


图 6.14-21　电化学液相沉积成形技术原理示意图

在该电化学液相沉积成形工艺中，镀有导电材料或是由导电材料制成的底板作为阴极被浸入装有电解液的电解槽中，阳极由被沉积材料制成的针状电极构成，在针状电极与底板之间置有一薄层金属粉末。在电场的作用下，电解液中的金属离子在金属粉末微粒上沉积下来并不断生长，从而将金属粉末微粒连接在一起。通过控制针状电极的运动和电场的强度、作用时间以及电解液的成分等，就能将特定形状的三维实体原型零件逐层堆积成形。

在该电化学液相沉积成形工艺中，针状电极与底板之间形成 Z 向电场，两个方向彼此垂直设置的辅助电场形成 $X-Y$ 平面电场，另有一个 Z 向辅助磁场作用于底板下方。$X-Y$ 平面的辅助电场用来增加沉积在金属粉末微粒周围的被沉积材料的数量，辅助磁场则提高了底板上铁磁性金属粉末微粒的积聚密度。

研究发现，这项工艺有如下一些特点：①工艺中的电化学沉积过程是一个分形生长过程，被沉积材料作为"粘结剂"将金属粉末颗粒连接在一起，最终的原型零件由被沉积材料与金属粉末颗粒共同构成，因此能够获得较高的成形速度。设计形状合适的阳极还能进一步提高成形速度。②针状电极能将 Z 向电场集中束缚于底板上很小的区域内，且仅在该区域内发生沉积过程，从而能够获得较高的成形精度。③$X-Y$ 平面的辅助电场、Z 向辅助磁场的共同作用，以及减小预置金属粉末微粒的层厚，可以使原型零件获得较高的密度和较低的收缩率。④通过改变预置金属粉末颗粒的成分组成和层厚，可以控制原型零件的微观组织。

6　基于化学沉积方法的快速制造技术的应用前景

与许多其他快速制造新技术一样，化学沉积技术与快速制造技术的集成，一方面提高了快速制造技术自身的成形能力，另一方面又为快速制造技术拓展了新的应用领域，并开辟了新的发展方向。

上述这些基于化学沉积方法的快速制造技术，已逐渐从试验室研究阶段进入实际应用阶段。它们独特的成形特性，在成形具有特殊结构或性能的功能材料、微电子器件或线路的定制与修复、微机械系统或零部件的制造、微细加工等领域发挥了特殊的作用，具有广阔的应用前景。

编写：薛　明（清华大学）

第 15 章　快速模具制造

1　快速模具概述与分类

模具是批量生产不可缺少的专用工具，但许多产品在试制过程中，尽管属单件生产也离不开模具的支持。模具设计、制造和调试的精度、寿命、周期和价格等决定了模具工业的水平。模具在汽车、航空、电子、电器、仪表、机械制造和轻工业等工业部门中得到极其广泛的应用。模具制造技术已成为衡量一个国家制造水平的重要标志之一。

1.1　快速模具概述

快速模具技术是近年来模具制造业中十分活跃的领域之一。产品竞争日趋激烈，产品能否快速响应市场已成为竞争制胜的关键，所以模具制造的快速性显得尤为重要，特别是在产品的试制阶段，因而快速模具应运而生。快速模具（rapid mould）是快速制造（rapid manufacturing）的重要组成部分，有时也泛称为快速工具（Rapid Tooling，简称 RT）。它是采用快速制造的原理和方法制造模具和工具的技术方法，由此可得快速模具和 RT 的定义：基于离散－堆积成形原理，由模具 CAD 数字模型驱动的，制造工具、模具和专用夹具的工艺、技术和方法。许多传统模具制造工艺，特别是一些经济模具制造工艺，如中低熔点合金模具、电铸模、喷涂模等工艺方法，由于并不采用基于离散－堆积成形原理，并非由模具的三维 CAD 模型驱动而制造模具，因而此类工艺方法并不属于快速工模具的范畴。但此类制模方法由于工艺简单、经济且速度较快（其缺点是精度和寿命较差），工程上习惯称为快速模具，本书暂且也称其为快速模具。如果此类快速模具翻制用的母模是由快速制造方法完成的，则应属快速模具，是间接快速模具的范畴。

快速模具主要之优点在于缩短制模时间、降低设计风险、改善产品质量、早期测试、减少模具的反复修模次数、降低经济损失和产品及时开发。快速模具与数控切削加工制模技术的比较如表 6.15-1 所示。

所有非直接成形的快速模具均需通过母模进行转换（翻制），此种母模需承受各种翻制条件的作用，如陶瓷浆料的浸蚀、低温金属液体的作用、材料微滴的冲击等等，母模需具有一定的强度、精度和表面质量，此种母模（即原型）之功能已超出了原型的评价功能，应该说制作母模已属于 RM 的范畴，母模应称为 RM 原型，而不应称为 RP 原型、或 RPM 原型。但在工程上，已习惯将快速制造（基于离散－堆积成形原理的成形工艺方法）完成的原型均称为 RP 原型或 RPM 原型，本书在此重申，以下论述中，不再区分 RM 原型和 RP、RPM 原型，读者根据上下文即可知晓文中所指的是 RM 原型或 RP、RPM 原型。

表 6.15-1　快速模具与数控切削加工制模技术的比较

项　目	快速模具	传统金属加工制造模具
制造时间和成本	较少受零件复杂度的影响	受零件复杂度的影响
尺寸精度和表面质量	尺寸精度和表面质量须进一步提高	尺寸精度和表面质量好
驱动方式	直接 CAD 模型驱动制造	间接 CAD 模型驱动制造
模具尺寸	中小尺寸模具为主	大、中、小尺寸模具
模具类型	软模具、中间模具和硬模具	金属模具

1.2　快速模具技术的分类

按快速模具的使用寿命可分为软模具（soft tooling）、中硬模具（firm tooling 或 bridge tooling）和硬模具（hard tooling）；按快速模具的功能和用途可分为注塑模、铸模、蜡模及石墨电极研磨母模等；按制模材料可分为非金属模和金属模；根据不同制模工艺可分为直接模具制造和间接模具制造。

1）基于模具使用寿命的分类　根据模具的使用寿命，快速模具的种类可以分为软模具、中硬模具和硬模具，如图 6.15-1 所示。

模具相对寿命在 200 次以下定义为软模具，寿命在 200 ~ 5 000 次定义为中间模具或过渡模具，寿命在 5 000 次以上为硬模具。过渡模具适合零件的中小批量生产，是一种周期短、成本低的模具制造工艺。

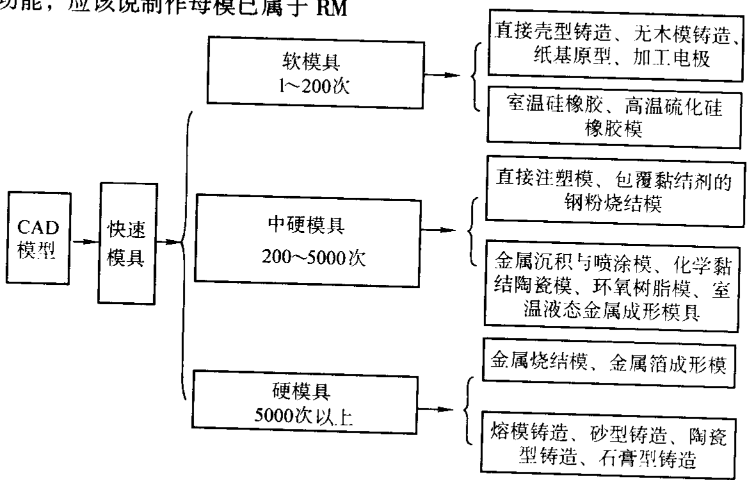


图 6.15-1　基于模具使用寿命的快速模具分类

2）基于模具使用材料的分类　根据快速模具材料的不同，快速模具技术可以分为非金属快速模具和金属快速模具。

非金属快速模具是指采用各种 RP 技术直接将 CAD 模型转换为非金属的原型，可直接作模具或模样使用。如美国 3D Systems 公司开发出一种可直接用于发泡工艺的环氧树脂模具，称为 ACES（Accurate Clear Epoxy Solid），其寿命可达 1 000 件。杜邦（Du Pont）公司开发出一种高温下工作的光固化树脂，用 SL 工艺直接成形模具，用于注塑工艺，其寿命可达 22 件。

金属快速模具是指采用快速模具技术，根据 CAD 模型直接制造金属模具或通过过渡工艺（如铸造、金属沉积、电铸等）转化为金属模具。3DP、SLS 和 FDM 工艺最大潜在优势在于可直接制造金属模具，LOM 工艺也具有直接制造金属模具的潜力，如用金属箔材作为造型材料则可直接获得金属型（模具）。

3）基于模具制造方式的分类　根据快速模具制造过程中，转换次数的多少，快速模具可分为不需转换的直接应用、一次转换、多次转换及利用电极转换四类，如图 6.15-2 所示。

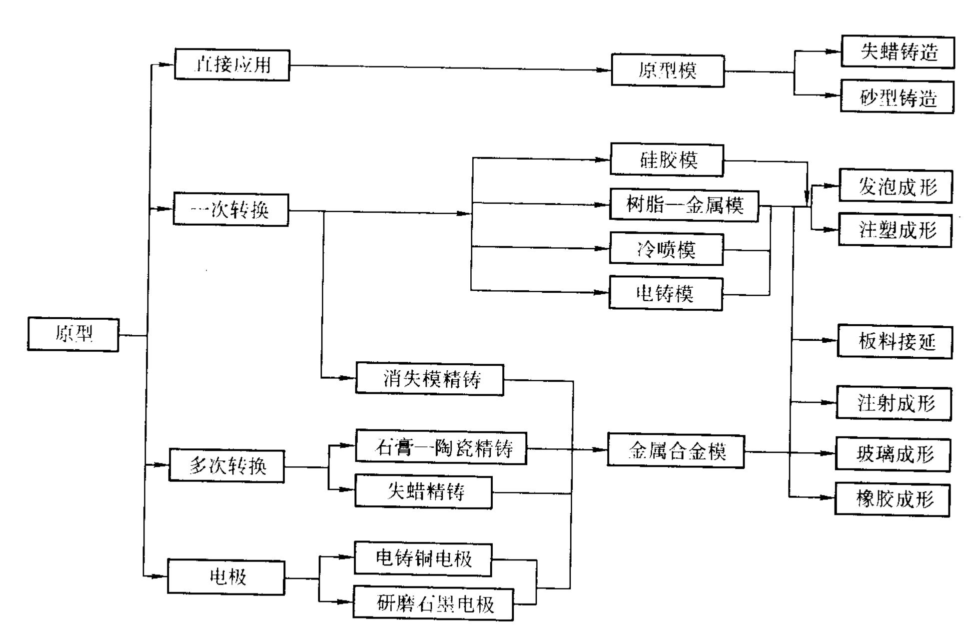


图 6.15-2　基于快速模具制造方式的分类

4）基于快速模具制造工艺的分类　根据模具的制造工艺，快速模具技术可以分为直接快速模具制造和间接快速模具制造。

直接快速模具制造指的是利用快速模具技术直接制造出模具产品，如铸造中使用的模样、熔模铸造中的蜡模、砂型铸造中的铸造砂型，然后对其进行一些必要的后处理即可达到所要求的性能、尺寸精度和表面质量。直接模具制造的特点是工艺转换步骤少，模具的尺寸精度高，制造周期短，应用范围广，制造环节简单，能够较充分地发挥快速模具的技术优势。模具的寿命多达 10 000 件以上，寿命主要取决于模具材料与 RM 工艺。直接制造的模具可以用于产品开发、小批量生产，许多情况下已用于大批量生产。但总的来说快速模具在精度和性能等方面与其他工艺相比还存在一定差距，特殊的后处理设备与工艺使其制造成本也有所提高，成形尺寸受到较大的限制。

间接模具制造是通过快速模具技术与传统的成形技术如精密铸造、粉末冶金、金属沉积等有效地结合，实现模具快速制造的技术。间接模具制造技术可以根据不同的应用要求、不同的结构复杂程度和精度要求，合理选择快速模具技术与传统成形技术，达到一方面可以较好地控制模具的精度、表面质量、力学性能与使用寿命，另一方面也可以满足经济性要求的目标。

表 6.15-2 按照模具的翻制技术将间接快速模具制造进行了分类。

表 6.15-2　间接快速模具技术分类

模具翻制技术		RM 技术	原型材料	主要特点
铸造法	熔模铸造	SL	树脂	原型为中空结构，外挂陶瓷浆料，高压釜或烧结脱模，陶瓷壳易碎
		SLS	石蜡	石蜡原型易脆，不便搬运
			PS、PMMA	塑料原型表面精度及准确度高，易搬运，不易从成形平台移开
			CastForm PS	壁薄，残留灰分少，制作周期短
		FDM	石蜡	石蜡熔化，无需起模，无需分型面
			ABS	原型强度比石蜡高，需要手工后处理，在高温炉中烧掉原型
		LOM	纸	原型为纸逐层叠加制作，残留灰分多，不易清除
	砂型铸造	RM①	任意	采用各种 RM 技术先制作芯子，然后制造出铸造用砂型



续表 6.15-2

模具翻制技术		RM 技术	原型材料	主要特点
铸造法	石膏型铸造	LOM	纸	原型作为模具灌石膏，起模后低温烘干、焙烧
		SLS	聚苯乙烯	在较低的温度下即可去掉原型
	消失模铸造	FDM	聚合物	塑料模被烧挥发成气体
			冰	室温即可去掉冰型
		LOM	纸	已经很少使用
	陶瓷型铸造	RM + 喷射	任意	在 RP 技术制作的原型表面喷射陶瓷浆料，干燥、焙烧而成铸型
金属喷涂沉积		RM + 电弧喷射	任意	技术流程为：RP 原型→硅胶模→过渡基模（石膏、陶瓷）→喷涂背衬→去除基模→模具辅助件安装。主要喷射低熔点金属
		RM + 等离子喷射	任意	技术同上，主要喷射高熔点金属，模具表面硬度高，使用寿命长
电铸法		RM + 电铸	任意	电铸母模可以为任一 RP 原型，电铸金属可为铜和镍。由于 SL 原型表面精度和尺寸精度高，因此 SL 技术成为主要原型制作手段
粉末冶金成型		RM	任意	3D Ketool 技术：采用 SL 原型先翻制成硅橡胶中间转换模，然后将工具钢粉灌注中间模中，烧结、渗铜处理后即可使用到
硅橡胶模		RM	任意	以 RP 原型为芯子浇注硅胶，凝固后成模。浇注宜在真空中进行
电火花加工		RM	任意	技术流程：RP 原型→翻制研具→研磨电极→电火花加工→模具

① 泛指各类 RM 技术。

1.3　快速模具技术的应用前景

使用快速模具技术，可以使模具的制造时间减少 1/3，成本下降 20%～30%，很好地解决模具开发速度滞后于产品开发需要的矛盾。各种快速模具的技术－经济参数比较见表 6.15-3。

表 6.15-3　快速模具技术－经济参数比较表（引自：T. Wohlers：Wohlers report 2000）

项目	硅胶模	Al 充填环氧树脂模	直接 AIM 模	喷涂金属模	锌合金模	Rapid Tool	3D Keltool	铣削铝
入市时间/周	0.5～2	2～4	1.5～3	2～4	3～2	2～5	3～6	2～6
成本/美元	1 000～5 000	2 500～10 000	2 000～5 000	2 000～15 000	4 000～15 000	4 000～10 000	3 500～10 000	4 000～25 000
典型件数	10～50	50～1 000	10～50	50～1 000	50～1 000	50～100 000	50～1 000 000	50～100 000
材料	尿烷、环氧树脂、石蜡	热塑性塑料	热塑性塑料	热塑性塑料	热塑性塑料	热塑性塑料	热塑性塑料	热塑性塑料
模具精度/mm	0.05/25	0.05/25	0.05/25	0.05/25	0.08/25	0.08/25	0.05/25	0.025/25
特征细节公差/mm	0.05	0.05	0.05	0.05	0.127	0.127	0.127	0.05

注：入市时间系指模具从设计到进入市场的时间。

从表 6.15-3 可以看出各种快速模具都有自己的特点，与切削加工的模具相比，优、缺点也很清楚，这是它们各自市场定位的出发点。

工模具存在一个巨大的市场，世界范围内已经达到 650 亿美元产值的水平（亚洲占 39%，北美 31%，欧洲 23%）。这个市场对于模具的要求是全面的，如精度、材料、寿命、尺寸、形状复杂程度以及快速性。

目前的直接模具制造技术存在精度低，性能差等缺点。堆积金属（黑色金属、有色金属以及其他耐高温合金等）的难度决定了金属模具直接制造技术在未来几年内无法在该领域中占据主要地位。这一期间内，主要还是间接的快速模具制造技术，即经 RM 制造母模转换而制造模具的技术占主要地位。

基于快速模具所采用的材料不同，可以分为非金属模具与金属模具，涵盖了多种分类方法中列出的模具。因此，以下以非金属模具与金属模具之分类对国内外的快速模具情况进行介绍。

2　非金属模具

基于快速模具的非金属模具可分为直接非金属模具和间接非金属模具。其分类如图 6.15-3 所示。

2.1　直接非金属模具

2.1.1　铸造模具

采用 SLS、FDM 工艺可直接制造单件、小批量零件生产所需要的真空注塑模或熔模铸造的蜡模压型。直接采用快速原型机制造出 SSM、FDM、SL 等工艺的原型，可以用于铸造中的模样，直接用于设计校验、翻制硅橡胶模具、环氧树脂模具，也可用 CAD 直接驱动成形机制造出砂型，如直接壳型制造、无木模成形（见第 16 章）。



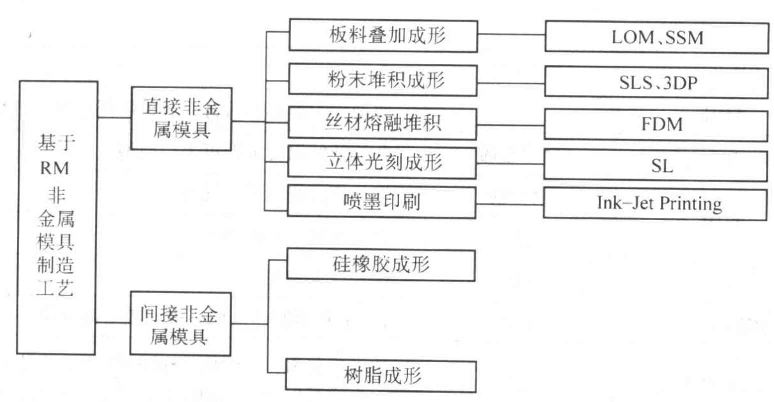
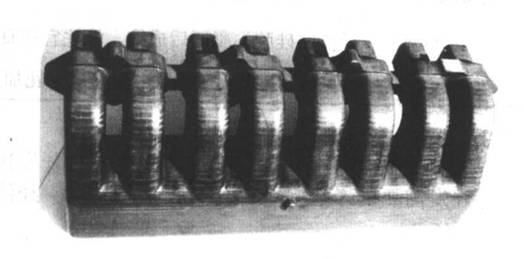
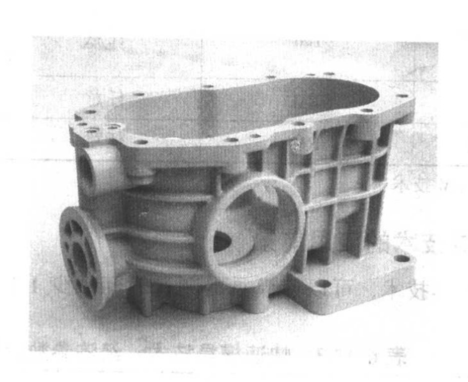


图 6.15-3　基于快速原型的非金属模具

采用 LOM、FDM、SL 等工艺成型的原型可直接代替传统木模，不仅大大缩短了制模时间，而且原型的尺寸精度比木模高。快速成型的 LOM 原型件具有较好的机械强度和稳定性，坚如硬木，可承受 200℃的高温。经表面处理后，可用作砂型铸造的木模，一般可用来重复制作 50～100 件砂型。其不足之处是 RP 原型长时间保存会产生变形。图 6.15-4 为 LOM 工艺制造的 RP 原型，可以用于铸造模样。



(a) 铸造用芯盒



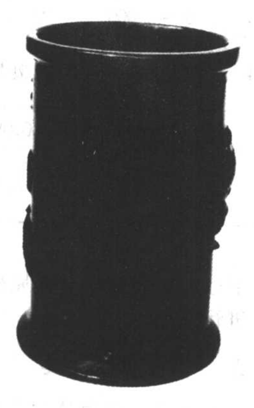
(b) 变速箱模型

图 6.15-4　LOM 工艺制造的 RP 原型（清华大学激光快速成形中心提供）

图 6.15-5 是清华大学激光快速成形中心为纪念 90 周年校庆，采用快速原型与熔模铸造工艺相结合制造的纪念品。



(a)FDM原型



(b) 青铜铸件

图 6.15-5　基于 RP 的精密铸造
（清华大学激光快速成形中心提供）

2.1.2　ACES™注塑模具

美国 3D Systems 公司开发出一种可直接用于发泡工艺的环氧树脂模具，称为 ACES（Accurate Clear Epoxy Solid），其寿命可达 100 件。日本的 NTT Data CMET 公司也有类似的工艺。

由于 Cibatool® SL5530HT 材料耐热温度可以达到 200℃，因此由该材料制造成的 SL 原型常常用于注塑模的模芯，其工艺过程如图 6.15-6 所示。

1）首先应用三维 CAD 软件首先设计出注塑模，将注塑浇口、补缩口等一并设计上，模具壁厚推荐厚度 1.27 mm。

2）然后采用 SL 原型机制造出原型。

3）去除支撑后，模具型腔进行抛光。模具的导热率比传统钢模具低 300 倍（Cibatool® SL5170 树脂的导热率是 0.200 2 W/mK）。为加大冷却，缩短注塑周期，在模具背面布设冷却管道，背衬材料采用 30%铝粉与 70%的环氧树脂。

4）注塑件从模具内取出后，通过对模具型面吹风，实施模具冷却。

直接 ACES™注塑模的主要缺点是模具的寿命直接受零件的形状、尺寸和操作者的技术水平影响，拔模斜度需要 0.5°～1°，每一个注塑周期都需要在模具上涂抹脱模剂以确保每一个注塑件容易从模具中取出。ACES™注塑模不可能具有加有铝粉环氧树脂模具的寿命，其背衬材料与形式影响到冷却时间，但对模具寿命影响不大。虽然 ACES™注塑模的注塑周期（3～5 min）与传统模具（5～15 s）相比有点长，但是特别适合于生产 100 件以内的模具制造，一般 7 天时间可以完成模具制造与注塑件生产。图 6.15-7 为日本的 SOUP 公司采用该工艺制造的模具并生产出注塑件。

为进一步增加模具的耐蚀性和导热率，在模具表面可以沉积 25 μm 的铜层。采用 SLS 成形工艺，直接生产材料为尼龙的注塑模，同样可以用于生产。

2.1.3　Copper Polyamide（PA）模具

Copper PA 模具制造工艺是原 DTM 公司于 1998 年 5 月提出的一种金属－塑料复合材料模具，主要用于小批量注塑件的生产（100～400 件）。模芯直接采用 SLS 工艺设备制造，分层厚度 75 μm。模芯在使用前必须打磨，但不需要加热焙烧，一般模芯一天内可以制造完成。



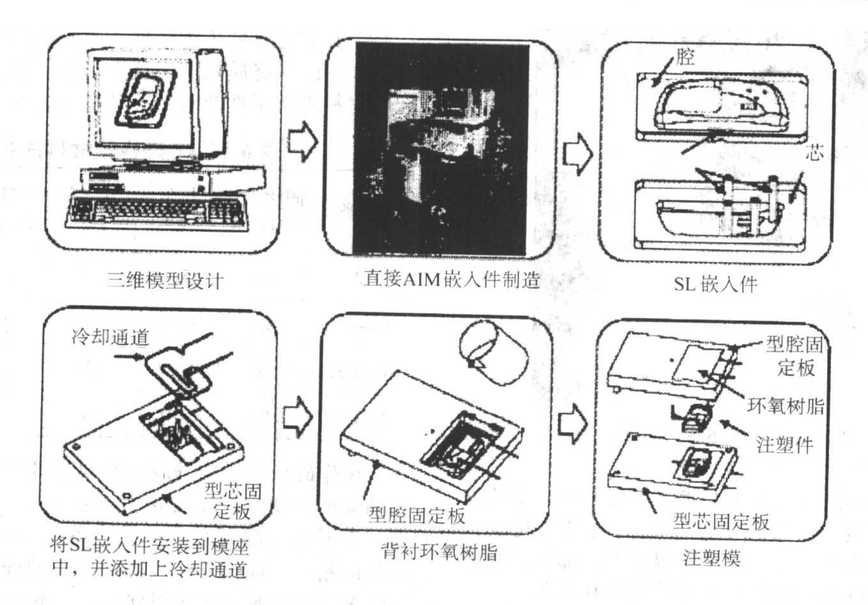
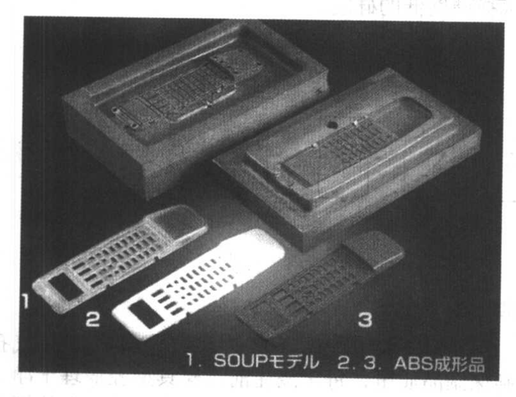
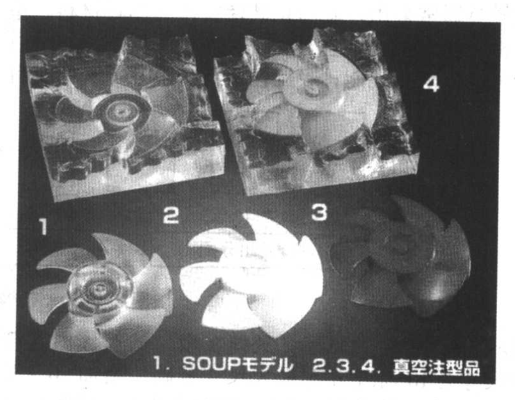


图 6.15-6 直接 AIM™模具制造工艺示意图（英国 Cardiff University 提供）



(a) 1－SL原型；2、3－ABS注塑制品

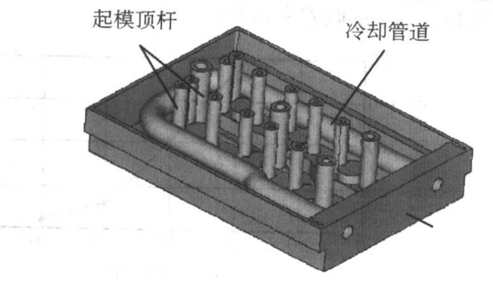


(b) 1－SL原型；2,3,4－真空注塑制品

图 6.15-7 直接快速模具制造制品（来自日本 www.cmet.co.jp）

在 CAD 设计期间，模芯内的冷却管道、起模顶杆、直浇口、横浇口等直接设计出（如图 6.15-8），并通过 SLS 工艺一起制造出来。然后，模芯表面用树脂密封，并用砂纸打磨，模芯背面用金属合金背衬，图 6.15-9 为采用该工艺直接制造的模芯。

采用 Copper PA 材料制造的模芯容易加工与打磨，其耐热性能与导热率优于大多数由塑料材料制成的模芯。其注塑周期与大多数金属模具的生产周期相差不大。



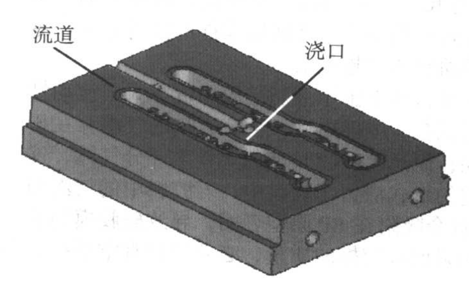


图 6.15-8 模芯背面 模芯工作面

2.2 间接非金属模具

以 RM 原型为母模，浇注硅橡胶、环氧树脂、聚氨酯等软材料可制造出软模具，这些软模具可用作试制、小批量生产用注塑模，或制造硬模具的中间过渡模、低熔点合金铸造模。这些软模具有很好的弹性、复印性和一定的强度，在浇注成形复杂工模具时，可以大大简化模具的结构设计，并便于脱模。如 TEK 高温硫化硅橡胶的抗压强度可达 12.4～62.1 MPa，承受工作温度 150～500℃，模具寿命一般为 200～500 件；一般室温固化硅橡胶构成的软模具寿命为 10～25 件，环氧树脂合成材料构成的软模具寿命为 300 件。

2.2.1 硅橡胶模具

对于形状简单、起模难度小的模具，可直接将 RM 原型作为模样用于造型；对于形状复杂、起模难度大的模具，采用 RM 工艺制造原型后，先制造出硅橡胶过渡软模，再将硅橡胶模作为模样用于造型。因硅橡胶模具有很好的柔软性、合适的硬度、弹性、脱模性和复印性能，可很好地将原型的复杂曲面复制下来，从而广泛用于快速制造小批量塑料件或


图 6.15-9 Copper PA 模芯生产的零件
（来自 www.3dsystems.com）

用于其他模具制造的过渡模。其主要优点是成本低、工艺简单，尺寸精度高，速度快，任意复杂形状的模具如花纹细腻、拔模斜度极小，甚至无拔模斜度的情况下，都可以制造获得。影响硅橡胶模具质量的因素主要是材料和工艺。

（1）硅橡胶材料选择

硅橡胶模具通常采用室温固化硅橡胶作为模具材料，室温固化的硅橡胶具有如下一些优点：良好的耐高、低温性；耐氧、耐光和耐候老化性能；吸湿性极低，不易与其他材料粘合，具有良好的生理惰性，因此硅胶模作为中间转换模不会对产品的最终质量产生负面影响。对市场上销售的一些硅橡胶材料进行了性能对比，结果如表 6.15-4 所示。

表 6.15-4 硅橡胶材料性能对比表

硅胶类型	固化硬度(Shore A)	抗拉强度/MPa	伸长率/%	抗撕裂/N·mm^{-1}	收缩率/%	固化时间/h
T－2	42	5.5	300	12	<0.1	10
Silastic S	26	6.89	900	14	<0.1	7
RTV602	60	3.9	150	5	0.4	24
RTV604	30	3.9	250	8	0.5	24

用作硅橡胶模的硅胶材料要求具有较短的固化时间、较高的强度和硬度、较强的抗撕裂性能、较小的线收缩率和硅橡胶模不能与酸碱反应。从表 6.15-4 可以看出，为了提高模具的精度，应该选择线收缩率小的硅胶材料如 T－2 和 Silastic S 型硅橡胶。对于形状复杂、起模难度大的零件，应该选择硬度低的硅胶。

（2）硅橡胶模具制造工艺

硅橡胶模具制造工艺流程如图 6.15-10 所示。

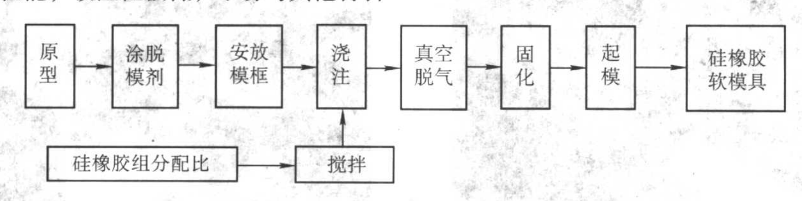


图 6.15-10 硅橡胶模具制造工艺流程

1）将经表面处理后的原型，悬挂在敞口的箱体内（箱体的内轮廓尺寸为 RP 原型轮廓最大尺寸基础上增加 20～30 mm）。在 RP 原型和箱体内侧均匀涂抹脱模剂（一般使用凡士林）。

2）计算箱体和原型的体积，求出所需要硅橡胶的量，按一定比例称取硅橡胶的主剂和固化剂，混合搅拌后，在真空中抽负压除气 2～3 min。

3）将混合好的硅橡胶浇入到箱体内，并抽负压 5～10 min，以除去浇注过程中卷入的气体。

4）经室温固化 10～14 h，取出 RP 原型，即可得到硅橡胶模具。开模的方式一般需要考虑随后零件的浇铸要求。零件越复杂，则开模面也必然越复杂。

真空脱气的主要目的是由于液态硅胶黏度很大、流动性极差，在与催化剂混合、搅拌之后，会有大量的气泡存在于胶料中，难以排除；而且灌硅胶时难免会卷入部分气体，这部分气体会以气泡的形式滞留于胶料中；若胶料中的气泡与 RP 原型相接触，就会吸附在 RP 原型表面，导致硅胶模型腔表面出现气孔，为确保硅胶模的质量，必须进行真空搅拌和脱气。

除了真空脱气以后，原料混合前后也要脱气。用来浇注成形的树脂材料包括两种组分，俗称 A、B 料（多元醇和异氰酸酯）。浇注环节中，原料排气仍然是最为重要的一步。因为两种树脂原料本身包含气体，混合搅拌时会卷入气体，而模具型腔中还存在气体，浇注时如果这些气体不及时排出，很容易在型腔内聚集成气泡，会直接影响到制品的成型质量甚至造成浇注的失败。因此加强排气尤为重要。实践中具体的解决措施是：①原料混合前排气，即把两种原料同时置于真空机中进行抽真空排气；②原料混合后排气，即把两种原料在真空状态下混合，同时快速搅拌，以便更多气体逸出。

在硅胶模上气体可能聚集的地方要增设排气孔。另外为确保制品质量，每次浇注前将模具型腔清理干净，并保证所有排气孔畅通，合模力大小要适当，过大会使模具变形，过小合模不紧密将导致原料溢出。

采用 Dow Corning 公司的 T－2 硅橡胶制造的软模具，其操作时间、凝固时间与环境温度关系分别如图 6.15-11、6.15-12 所示。从图中可看出，操作与固化时间随着周围环境温度的升高而缩短，主要由于温度加速硅橡胶材料固化反应引起。一般情况下，推荐采用室温固化，这样可以保证硅胶模具有最小的收缩率和好的性能。

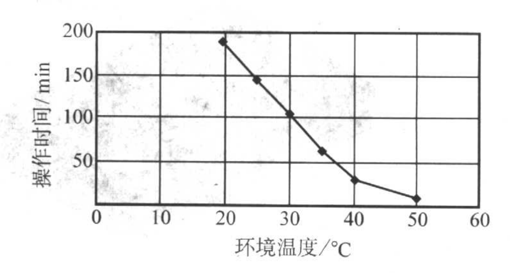


图 6.15-11 环境温度与操作时间的关系

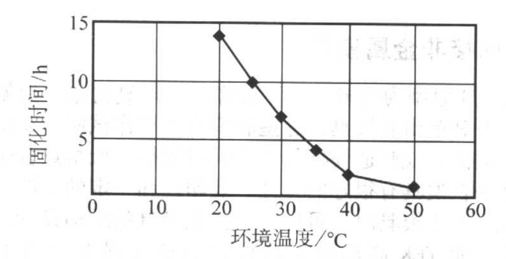


图 6.15-12 环境温度与固化时间的关系



(3) 硅橡胶模具在真空注塑中的应用

基于快速原型的真空注塑产品制造过程如图 6.15-13 所示。产品的 CAD 模型设计优化后，CAD 数据转换成 STL 文件，进行分层处理，驱动快速成形机，制造出产品原型。根据 RP 原型制造硅橡胶软模具，然后用于真空注模成形。

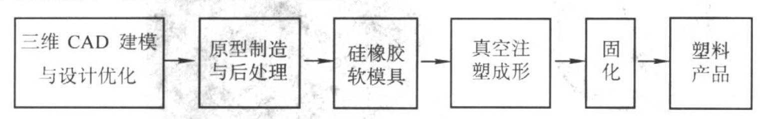


图 6.15-13　基于 RP 的真空注塑工艺流程

基于快速原型的真空注塑工艺的关键技术是软模具的制造与成形固化工艺，保证树脂能够充满整个型腔，获得表面质量好的零件。

国内武汉滨湖公司机电技术产业有限公司、陕西恒通智能机器有限公司等单位开发出了适合快速制模的真空注型机。图 6.15-14 为武汉滨湖公司的 HZK－IB 真空注型机，主要工艺参数为：最大注型尺寸 680 mm × 480 mm × 540 mm；真空度 50 Pa。陕西恒通智能机器有限公司也有多种型号的真空注型机，其 ZK500 真空注型机的主要工艺参数为：最大注型尺寸 580 mm × 500 mm × 1 050 mm；真空度小于 －0.095 MPa。真空注型机可以广泛用于汽车、家电、轻工、医疗、农业机械及军工等行业的研发和小批量生产。

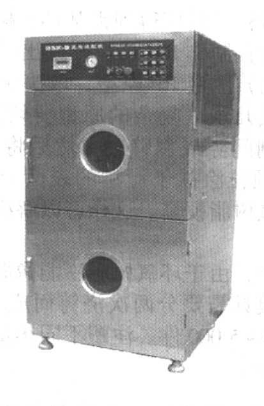


图 6.15-14　HZK－IB 真空注型机（武汉滨湖机电公司提供）

(4) 真空注塑工艺

在硅橡胶模具上加工出气口和浇口，硅橡胶上、下模合箱、装配，放置在真空注模机工作台上。根据零件的重量，配置双组分的树脂（主剂和固化剂），并放进真空注模机内，抽负压（0.1 MPa，3～10 min），双组分（主剂和固化剂）在真空条件下混合搅拌，立即浇注。一般自然硬化时间一般为 30～90 min 后即可起模，一般 4 h 后即可达到材料的性能。在加热状态下可以进一步缩短起模和硬化时间。采用这些树脂材料制成产品的肖氏硬度可以达到 70～80，耐热温度一般 60～100℃。

(5) 制造精度与周期

对 RP 原型与制造的塑料零件的尺寸测试结果如表 6.15-5 所示，从表中可以看出，该工艺制造的零件具有较高的尺寸精度，一般可以控制在 ±0.1 mm 内，表面粗糙度一般可以达到 RP 原型的表面质量，可以满足零件的技术要求。

表 6.15-5　尺寸数据测试表　mm

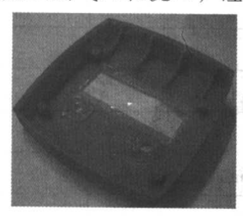
RP 原型	6.3	11.9	23.98	59.56	64.6	67.6	67.88	83.4
树脂零件	6.38	12.0	23.88	59.58	64.52	67.58	67.98	83.5
尺寸误差	－0.02	0.1	－0.1	0.02	－0.08	－0.02	0.1	0.1

一般 CAD 模型设计出来后，1～5 d 时间内可以制造获得 RP 原型，24 h 内可以制造获得硅橡胶模具，1～2 d 内可以完成树脂零件的制造，整个制造时间约为 3～7 d，用户即可获得自己的产品。

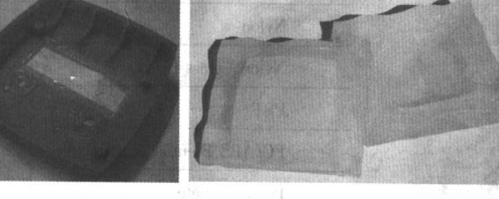
(6) 注塑件的快速制造

清华大学激光快速成形中心采用 SL 工艺制造出 RP 原型，然后制造硅橡胶模，最后采用快速注型树脂 F33 为某公司制造出的仪表盒件如图 6.15-15 所示。

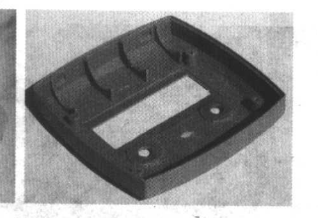
采用 SSM－800 叠层快速制造设备制造出纸型原型，然后制造硅橡胶模，制造出的手轮如图 6.15-16 所示。



(a) SL原型



(b) 硅橡胶模具



(c) 注塑零件

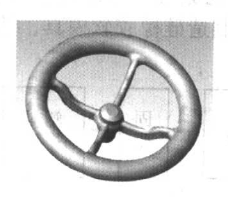
图 6.15-15　仪表盒件的快速制造（清华大学激光快速成形中心提供）

图 6.15-17 为武汉滨湖机电技术产业有限公司利用 LOM 工艺制造的汽车车灯快速成形原型件翻制出硅橡胶模具，开模后得到的汽车车灯塑料件。整套工艺的制作时间为 16 h。

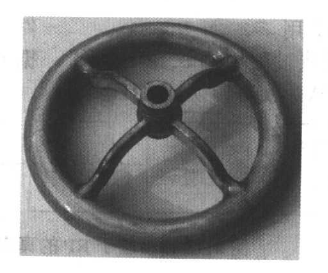
图 6.15-18 是某泵壳制作过程。该产品用传统机加工方法很难加工，必须通过模具成形。若采用常规制造工艺，模具的制造时间需要 8 个月，费用至少 30 万元。如果产品设计有误，可能会造成整套模具报废。北京隆源自动成型系统有限公司采用 SLS 工艺，首先制作出 RP 原型，然后将 RP 原型固定在标准模框中，浇入混合搅拌好的硅橡胶。室温固化 12～20 h，待硅橡胶完全固化后，打开模框，取出硅橡胶。用刀沿预定分型线将其划开，将母模取出，用于浇铸泵壳蜡型的硅胶模即翻制成功。采用硅橡胶模翻制出蜡型，经过涂壳、焙烧、失蜡、加压浇铸、喷砂后，一件合格的泵壳铸件在短短的两个月内制造出来。再经过必要的机加工，即可装机运行，整个试制周期比传统方法缩短了三分之二，费用节省了四分之三。

2.2.2　环氧树脂模具

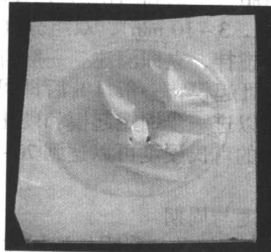
环氧树脂模具的制造过程和硅橡胶模具的制造过程一致，只是将硅橡胶换成掺有铝粉的环氧树脂。它采用环氧树脂作为模具主要材料，以 RM 原型为母模，在 RM 原型表面涂一层环氧树脂，再在后面填充混有铝粒（或者金属颗粒）



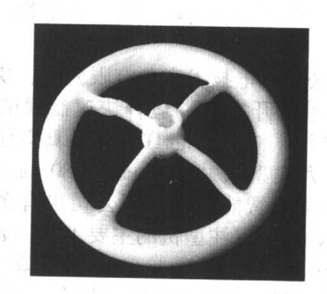
(a) CAD模型



(b) LOM原型

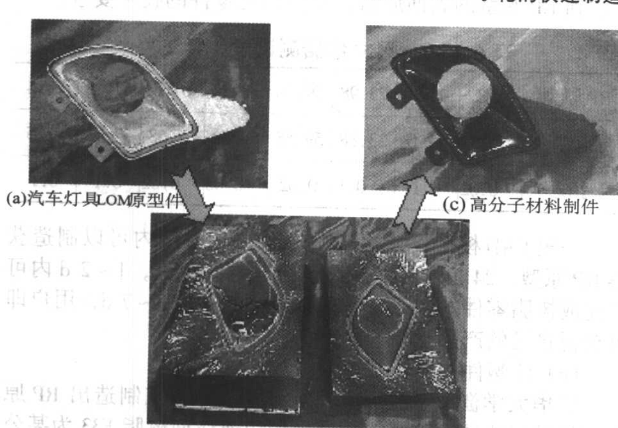


(c) 硅橡胶模具



(d) 注塑件

图 6.15-16　手轮的快速制造（清华大学激光快速成形中心提供）



(a)汽车灯具LOM原型件

(c) 高分子材料制件

(b) 硅橡胶软模

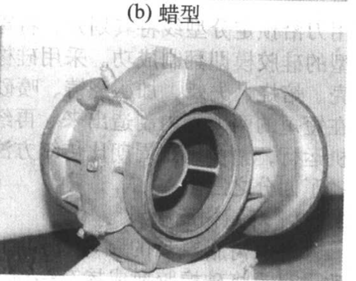
图 6.15-17　汽车车灯快速制造（武汉滨湖公司提供）



(a)硅胶模　(b) 蜡型



(c) 合金铸件



(d) 合金铸件

图 6.15-18　泵壳制作过程（北京隆源自动成型系统有限公司）

的环氧树脂作为背衬，脱模得到铝基环氧树脂模。

其工艺步骤为：制作 RM 母模，画出分型线，设计套装夹具（通常为木制）固定 RP 原型，取决于原型的复杂程度将木制夹具切割成几块（复杂的原型要切割成 10 ~ 15 块），将石蜡灌注到切割间隙或裂缝中，然后将 35% 的环氧树脂和 65% 的增强铝颗粒涂抹于原型的表面上，进行修整后制成铝颗粒增强环氧树脂模具。这样可以解决模具的导热性与强度问题。

在制造过程中，由于环氧树脂不能像硅橡胶模具那样能刀切分型，整个模具需要分两次浇铸而成。用于注塑模时，其寿命一般为 500 ~ 5 000 件。注塑不同热塑性材料的模具寿命如表 6.15-6 所示。

表 6.15-6　铝粉增强环氧树脂模具寿命（3D Systems）

材料	模具寿命/件
ABS	200 ~ 3 000
Acetal	100 ~ 1 000
Nylon	250 ~ 3 000
Nylon（glass filled）	50 ~ 200
PBT	100 ~ 500
PC/ABS Blends	100 ~ 1 000
Polycarbonate	100 ~ 1 000
Polyethylene	500 ~ 5 000
Polypropylene	500 ~ 5 000
Polystyrene	500 ~ 5 000

从 20 世纪 60 年代开始，国内很多企业及科研部门就开始用树脂制作铸造模具，但到目前为止，仍采用低档的不饱和聚脂或普通环氧树脂，因其收缩率大、机械性能低、尺寸稳定性差，只能制作精度低、寿命短的简易模具，造成国内树脂模具技术停留在欧美发达国家 50 年前的水平。从 20 世纪 90 年代中旬开始，越来越多的铸造企业逐步采用先进的模具树脂系统，我国的树脂模具技术已开始与国际水平接轨。尤其是 RP 技术出现后，采用 RP 原型为母模，可以直接翻制出环氧树脂模具，可进一步缩短模具的制造周期。



3 金属模具

基于快速原型的金属模具制造工艺也可分为直接制造工艺和间接制造工艺。目前在开发研究的 20 多种基于快速原型的金属模具制造工艺中，已经应用到生产中的制造方法主要是间接制造工艺。基于快速原型的金属模具制造工艺分类如图 6.15-19 所示。

基于快速原型的金属模具直接制造工艺是指利用 RP 技术直接制造出最终的金属模具，然后对其进行一些必要的后处理即可达到所要求的力学性能、尺寸精度和表面粗糙度。直接制造工艺具有其独特的优点，如制造环节简单，能够较充分地发挥 RP 技术的优势，特别是与计算机技术密切结合、快速完成产品制造，直接制造工艺的缺点主要是在模具精度和性能控制等方面比较困难，特殊的后处理设备与工艺使制造成本提高，成形尺寸也受到较大的限制。目前，金属模具的直接制造工艺已经成为国内外快速制造领域的研究重点和主要发展趋势之一。

与之相比，基于快速原型的金属模具间接制造工艺是指通过快速原型技术与传统成形技术有效的结合，实现模具的快速制造。由于传统技术的多样性和成熟性，可以根据不同的应用要求，使用不同复杂程度和成形精度的工艺，一方面可以较好地控制模具的精度、表面质量、力学性能与使用寿命，另一方面也可以满足经济性的要求。因此，目前工业界多数使用的是金属模具间接制造工艺。

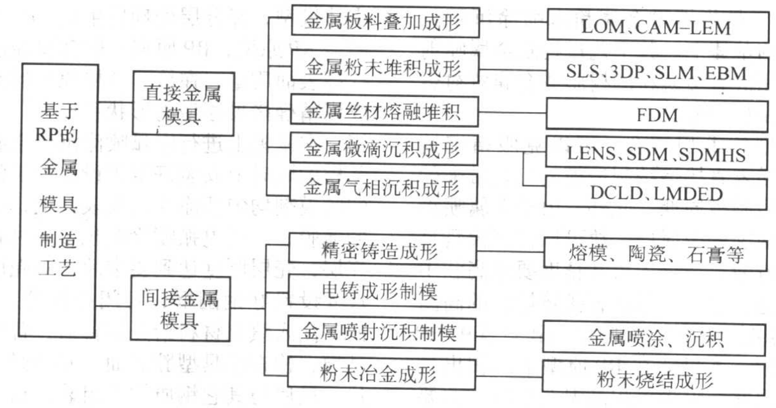


图 6.15-19 基于快速原型的金属模具制造工艺分类

3.1 直接金属模具

基于 RM 的金属模具直接制造工艺因其不需要工艺转换，在制造周期等方面具有很大的应用潜力，从而受到高度关注。目前主要典型工艺有金属板料叠加成形（LOM、CAM－LEM)、金属粉末堆积成形（SLS、SLM、3DP）和金属微滴沉积成形（SDM、LENS、SDMHS 、DLCD、LMDED）工艺，它们的详细描述见第 12 章，金属粉末堆积成形之一的 EBM 见第 13 章，金属气相沉积技术见第 14 章。

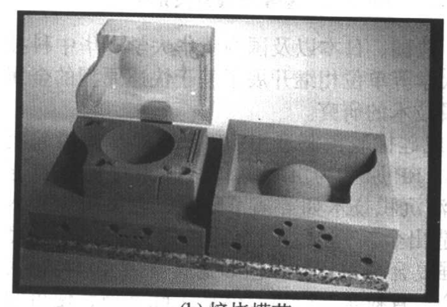
美国麻省理工学院基于 3DP 工艺，利用喷头有选择地向金属粉末喷射黏结剂，采用金属粉如不锈钢、碳化钨等，在保证金属粉对所喷射的化学黏结剂具有较好的湿润性的条件下，利用黏结剂使金属粉末成形。这种低密度的（约 50%）成形件经去除黏结剂和渗铜处理，便可得到致密度达到 92%以上的模件。对其表面进行抛光打磨处理后就可作模具使用。其典型过程是：

1）通过 3DP 工艺使粉末与黏结剂成形；
2）焙烧成形件以增强其强度；
3）通过低熔点合金浸润焙烧件转变成为致密件。

这种方法的优点是可以使用多种材料，材料多样性既可以体现在不同成形件上，也可以体现在一个件上。图 6.15-20 为采用该工艺成形的模芯。



(a) 成形模芯



(b) 焙烧模芯



(c) 浸润低熔点合金得到的金属模芯

图 6.15-20 采用 3DP™ 工艺制造的模芯（来自 web.mit.edu/tdp/www/applications.html）



3.2 间接金属模具

RP方法制造的原型主要以非金属型为主（如纸、ABS、蜡、尼龙、树脂等），在大多数情况下非金属原型无法直接作为模具使用，需要以RP原型做模样，经过工艺转换，制造金属模具。间接制造的特点是RP技术与传统成形技术相结合，充分利用各自的技术优势，成为目前应用研究开发的热点。间接制造工艺可以概括为：金属喷涂沉积制模、精密铸造成形制模、电铸成形制模、粉末烧结成形制模和电加工电极成形制模。通过这些方法，可以实现金属模具的快速制造。

3.2.1 金属喷涂沉积制模

金属喷涂沉积制模主要是指熔融金属粉末喷涂沉积到RP原型或经RP原型转换的基体上。其工艺过程是金属喷射沉积出金属壳型，然后采用混有金属粉的树脂或金属背衬金属壳层，去除基体后即可制造出模具。

将金属喷涂与RP原型技术相结合，可以克服精密铸造、金属熔覆制造和金属粉末直接烧结制造模具工艺带来的整体收缩和变形问题，缩短制模周期。此外，由于金属喷涂沉积表面可以形成耐磨、耐蚀的金属层，故可以保证模具具有较高的制造精度和使用寿命，适合于尺寸精度要求高和中等复杂程度模具的快速制造。然而，不能直接将熔融的高温合金微滴直接喷涂到RP原型上，因为在喷涂沉积过程中RP原型会受热变形，甚至开裂，不可能在RP原型上沉积出具有一定厚度的金属壳层。因此，喷涂沉积高温合金时，需要开发一种中间转换体，即基模。RP原型、基模与模具之间的关系如图6.15-21所示，基模从RP原型上拷贝其形状和尺寸，然后又将此结果转而拷贝于模具。

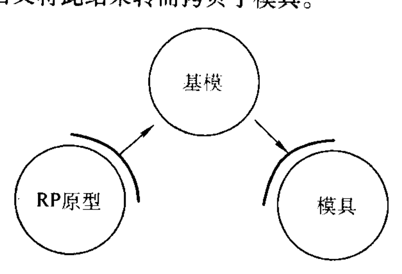


图6.15-21 RP原型、基模与模具关系图

美国、英国、法国、日本以及国内清华大学、华中科技大学、西安交通大学等单位相继开展了基于快速原型的金属喷涂沉积制造模具技术的研究。

通过RP原型或硅橡胶模制造出RP基模即金属喷涂沉积的基体或直接以RP原型为沉积基体（喷射中低熔点合金），采用金属微滴沉积技术如等离子喷涂、电弧喷涂技术在基模上沉积制造出金属壳层，当金属壳层达到预期厚度后，通过金属增强复合材料背衬工艺如金属喷涂沉积与精密铸造等工艺相结合，背衬金属壳层，然后去除基模，便可制造出具有较高尺寸精度和好的表面质量的金属模具。该技术可以较准确地复制基模的形状、尺寸和花纹，具有工序简单、制造周期短、生产成本低等优点。其关键技术为：RP基模的制造、喷涂沉积参数优化和金属壳层背衬工艺。该工艺制造模具周期短，可完成具有材料梯度结构的高质量模具制造，获得高硬度、高耐磨性、耐腐蚀性的模具表面；可制造注塑模、拉延模、消失模等各种模具，适用面广。

在基于RP原型的金属喷涂沉积过程中的主要技术难点有以下两点。

1）如何防止金属壳层的翘曲、开裂，能够沉积出一定厚度的金属壳层。直接在RP原型上只能沉积低熔点合金材料，沉积高熔点的合金材料时容易引起原型的变形和开裂。采用RP基模喷涂沉积高温合金材料，需要研究RP基模的配方和工艺，还要优化金属沉积工艺参数。

2）如何在表面光滑且不能进行表面毛化处理的基模上，喷涂沉积出一定厚度的金属壳层。在热喷涂技术如等离子喷涂、电弧喷涂工艺中，为提高喷涂层与基模表面的结合强度，在喷涂沉积前对基体表面进行清洗、除油和表面毛化处理是工艺中的一道很重要的工序。但是RP基模不能进行毛化处理，否则将降低模具的表面质量，不能精确地拷贝RP原型的形状。

（1）基于RP原型的电弧喷涂沉积模具制造技术

基于快速原型的电弧喷涂制模工艺流程见图6.15-22。首先根据产品的二维图纸或者三维扫描数据建立三维CAD实体模型，经分层处理后生成STL文件，驱动快速原型设备制造RP原型，RP原型一般都要经过表面打磨等处理工序以提高表面质量，在检测合格原型的基础上制造硅胶模，用硅胶模精确拷贝原型的形状和尺寸，之后利用硅胶模来制造基模，在基模上进行电弧喷涂沉积金属壳层制造模具。在制造基模的同时要安装好事先设计加工的镶嵌件，之后将配制好的脱模剂均匀喷涂在基模表面上，形成厚度合理并均匀分布的薄膜，之后电弧喷涂沉积金属材料，形成一定厚度的金属壳层，壳层厚度达到要求后，对壳层修理整形，按壳层周边尺寸设置好钢围框，封闭好缝隙，清理好围框内的壳层表面，注入填充材料给壳层背衬，背衬固化后，清理去除过渡基模，检查模具型腔表面，必要时进行抛光处理提高表面质量，最后与其它钢质构件组装，获得一套完整的模具，上压机调试。图6.15-23是基于快速原型的电弧喷涂制模工艺过程示意图。

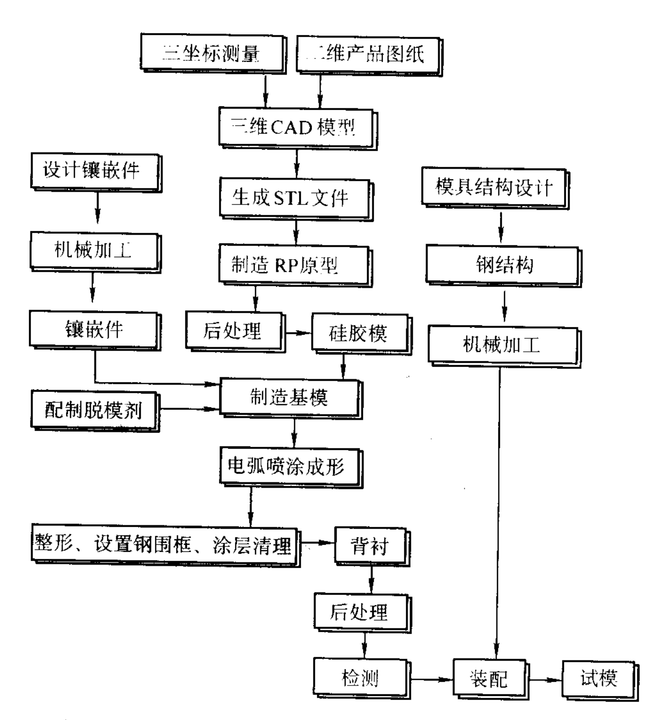


图6.15-22 基于快速原型的电弧喷涂快速制模工艺原理图

从上述工艺过程可以看出，采用该工艺制造的模具基本结构可以分为三部分，即金属喷涂层、背衬层和钢结构。就锌合金模具而言，其模具的喷涂层由锌合金微滴固化而成，喷涂时锌合金丝材受热熔化后经压缩气体雾化形成金属微滴，微滴喷射撞击在过渡模表面上，经过伸展变形、叠加固化形成一层致密的金属壳层，构成模具型腔的表层，其厚度与模具的种类和用途有关。比如对于常规的聚氨酯塑料成型模具，由于塑料成型在常温常压下进行，模具受力小，涂层



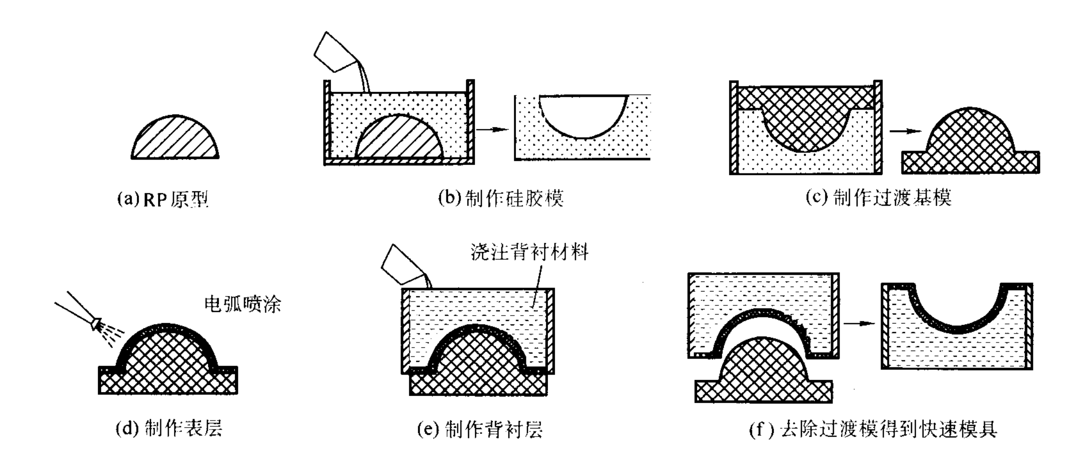


图 6.15-23 基于快速原型的电弧喷涂制模示意图

厚度在 3～5 mm 范围内就可以满足要求；对于注射成型模具，由于成型的压力和温度高，模具受力大，而且散热性要求高，因此涂层厚度要大，一般在 10～20 mm 范围内；对于金属板材拉延模具，其锌合金涂层厚度要保持在 3～10 mm 左右。喷涂层具有一定的强度、硬度、但由于其厚度较薄，还无法单独承受成型压力，因此不能直接作为模具，必须进行背衬补强。背衬层由背衬材料直接充填而成，厚度较大，黏附在喷涂层下方，主要起支撑和增加强度的作用。常用的背衬材料有树脂砂、环氧树脂、低熔点合金（如铋锡合金）等。对于有冷却要求的模具，在浇铸背衬材料前应在背衬层内将冷却管道埋设好，凝固后即固定在模具中。钢结构主要包括模架、围框、镶嵌件等钢质构件。从上述分析可见，电弧喷涂模具表层由喷涂层（如锌合金），内部由背衬层（如铋锡合金）构成，因此能够合理利用各种性能的材料，材料呈梯度分布。图 6.15-24 是电弧喷涂锌合金快速模具的结构示意图。

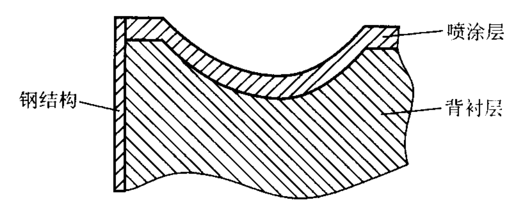


图 6.15-24 电弧喷涂模具结构

基于快速原型的电弧喷涂制模工艺是以 RP 原型为基础，经过硅胶模、基模两道中间过渡工序，最后在基模上喷涂成形，再经过壳层背衬等工序完成快速模具的制造。该工艺中的关键技术主要包括 RP 原型制造工艺、硅胶模制造技术、基模制造工艺、电弧喷涂工艺以及背衬工艺等。其中 RP 原型制造工艺、硅胶模制造技术已经在前面相关章节已经加以阐述过了，下面重点讨论基模制造工艺、电弧喷涂工艺以及背衬工艺。

1）基模制造工艺　电弧喷涂过程中，基模既要直接承受金属微滴的冲击，又是模具形状的传递者，要求具有一定的强度、硬度和良好的尺寸精度，因此基模的材料选择和制造工艺至关重要。

电弧喷涂制模工艺可以采用多种材料制成的基模，比如水泥、石膏、陶瓷等。

① 水泥　用水泥制作喷涂基模具有工艺简单、价格便宜、强度高等优点，而且水泥材料基模表面较为粗糙，喷涂时与金属的附着力大，容易沉积形成厚度大的金属涂层。其主要缺点是基模的溃散性差，喷涂完成后去除基模困难，而且水泥的固化时间较长，基模的尺寸精度和表面质量也都不理想。

② 陶瓷　陶瓷是一种优良的基模制造材料。电弧喷涂制模工艺中可以选用无焙烧陶瓷基模。另外一种陶瓷基模制造工艺为在零件原型或者硅胶模上浇注陶瓷浆料形成陶瓷基模坯体，并立即冷冻定型，冷冻可以使陶瓷型表面上形成像冰晶一样的结晶结构。冷冻结束后，将陶瓷型从其主模型（原型或者硅胶模）上分离，并立即投入焙烧炉中焙烧，这样可以快速去除陶瓷型中的水分，在结晶处留下微小的孔隙，喷涂时金属微滴撞击基模表面，一部分金属就会进入这些孔隙，与基模粘接在一起，从而增加了涂层对基模表面的附着力，提高了喷涂材料的成壳性。

③ 石膏　石膏制模操作简便，劳动强度小，具有成本低、尺寸精度高、表面质量好、复印性能良好等突出优点，石膏复制的模型表面轮廓清晰、形状完整，而且石膏的溃散性好，基模容易去除。

石膏基模的制作工艺过程见图 6.15-25。首先按比例量取所需重量的石膏、水和填料，先将石膏和填料混合料搅拌均匀，均匀投放到水中，边投放边搅拌，同时给硅胶模设置好围框，在模腔表面和围框四周表面均匀涂上脱模剂，然后将搅拌好的混合料均匀浇注到硅胶模中，边浇注边振动，以及时排除模腔中混合料可能包裹的气体，尤其是石膏型表面上的气体。浇注完成后，打平石膏上平面。凝结 1～2 h 后，石膏型固化定型后起模，对基模进行表面检查，对模型表面上可能存在的气孔等缺陷迅速填补打平，之后投入烘干机中在 100℃ 温度下烘干 10～14 h，取出后得到合格的基模。如果石膏型很大，制作时要在模型内预埋钢质骨架以提高模型整体强度，不会因搬运而断裂，同时还要设置吊装机构。钢质骨架应该设置在硅胶模围框之内，模腔型面之外。

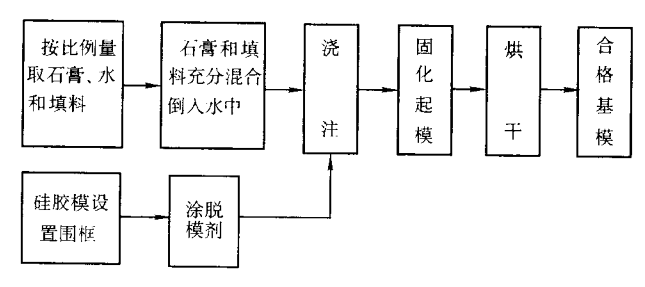


图 6.15-25 石膏基模制造工艺流程

石膏基模制作完成后，还要对模型进行适当的修整，去除模型尖角部分以免喷涂时涂层开裂，有的地方还要安装镶嵌件。因为模具的某些部位有一些特殊要求，比如一些部位



要求具有高的强度、硬度和耐磨性等，喷涂层的材料性能往往无法达到这些要求，而有些部位存在深孔和细高的加强筋等，喷涂法难以成形，这时候就要在基模上安装金属镶嵌件，喷涂时金属壳层将镶嵌件的一端包围固定，埋入基模的另一端就成为模具型腔组成部分。镶嵌件的安装不能损坏基模表面，尤其是非埋入端的结构要有利于金属微滴的沉积，并能和背衬层牢固结合。在进行喷涂操作之前，还要在石膏基模表面上喷涂脱模剂，这一工序非常重要。喷涂脱模剂有利于模具完成后基模的去除，还能够黏结喷涂之初撞击到基模表面的金属微滴，减小微滴二次飞溅，增强喷涂层与基模表面的附着力，对于提高喷涂初期金属壳层的稳定性非常有利。一种性能优良的脱模剂是 PVA 混合料，由 PVA 和酒精等按照一定的比例配制而成。PVA 是一种水溶性材料，能很好地溶于温水中，易于清洗。对于石膏基模可以直接在表面上喷涂这种脱模剂，干燥后形成一层完整的薄膜。薄膜厚度必须均匀分布，大小合理，厚度太小，脱模作用小，而且对金属微滴的黏结力小，涂层易于开裂；厚度太大，会影响模具精度。

2）电弧喷涂工艺　在诸多喷涂工艺参数中，对工艺过程影响较大的主要有电弧功率、喷涂距离、喷枪移动速度和喷涂角度、送丝速度、气压等参数。

① 电弧功率　合理的电弧功率可以确保喷枪的电弧平稳，丝材良好熔化，金属微滴分布均匀，雾化射流集中。电弧功率过小过大都不利于喷涂过程的顺利进行，功率过小，起弧困难，易断弧，金属丝材熔化不良，雾化的金属微滴温度不够，撞击基模变形小，结合不好，从而降低涂层结合强度；功率过大，电弧过于剧烈，金属丝过热，温度过高的金属微滴撞击到基模表面上呈现溅射状，从而降低结合强度（理想的状态是撞击到基模表面后微滴呈圆饼状层层叠加在一起，形成致密坚硬的壳层），同时功率过大会使金属微滴氧化严重并且易于气化蒸发，降低了涂层的力学性能和金属沉积率。另外过高的功率还会使金属丝与送丝管焊合粘接。决定电弧功率大小主要有两个变量，即弧电压和弧电流。弧电压影响金属微滴中的热含量，提高弧电压，电弧功率增加，丝材尖端的距离增大，熔滴吸收更多的热量，温度升高，撞击到基模表面时变形充分，提高黏结强度，减小孔隙率。但温度过高，熔滴氧化严重，烧掉了喷涂丝材中不稳定的元素，喷涂层中的元素成分和丝材会略有不同。弧电流与材料的沉积效率有关，随着弧电流的提高，送丝速度加快，熔滴的初始速度增加，单位时间内撞击基模的金属粒子数量增加，因而提高了丝材沉积速率，同时传递给基模或者金属涂层较多的热量。喷涂时要正确选择弧电压和弧电流，使电弧功率合理。

② 喷涂距离　喷涂距离是指喷嘴到基模表面的距离。喷涂距离直接影响涂层质量和喷涂的成败。合理的喷涂距离可以使金属微滴撞击基模时的飞行速度最高，动能和撞击力最大，展平变形充分，微滴之间结合紧密。距离过大，金属微滴的温度和速度下降，动能减小，撞击基模时的变形小，结合强度降低，壳层内气孔率加大，组织疏松，脆性增加，沉积率降低。距离过小，基模表面局部温升过快，壳层过热，变形不均匀，热应力过大，壳层很容易隆起、翘曲和开裂，导致喷涂操作的失败。另外，喷涂距离过小时，压缩空气对涂层的影响增大，尤其是在喷涂之初，壳层很薄很脆弱，压缩空气会吹裂涂层。试验表明，采用电弧喷涂法喷涂锌、铝等材质的涂层时，喷涂距离在 150～200 mm 时涂层质量较好。

③ 喷枪移动速度和喷涂角度　电弧喷涂作业时由于喷枪温度的影响以及高温金属微滴的直接加热，喷涂层和基模表面温度迅速上升，很容易导致涂层和基模局部过热，使得涂层变形和热应力过大而脱离基模表面，出现翘曲、破裂等现象，导致喷涂失败。如果能在选择合理的喷涂距离的前提下，以适当的速度移动喷枪在不同的区域喷涂，将有利于涂层温度场的均匀分布，从而有效避免涂层的局部过热，既可保证喷涂顺利进行，又能提高涂层质量。对于尺寸较小的制品，要采取间歇喷涂方式，以使涂层有足够的时间散热。喷涂角度是指喷枪轴线和基模表面之间的夹角。实践表明当喷涂角度为 90°即喷枪轴线和基模表面垂直时喷涂效果最佳，因为此时大多数金属微滴都能与基模表面进行有效撞击，动能几乎全部转化为变形能，从而提高沉积效率和结合强度。为了减小遮蔽效应的影响，喷涂角度不能小于 45°，应保持在 60°～90°范围内。

④ 送丝速度　送丝速度的快慢直接影响金属微滴的沉积效率和涂层及基模温度。送丝速度的大小应和电弧功率相匹配，这样可确保丝材熔化速度合理，喷涂电弧稳定，金属微滴雾化均匀，射流集中，沉积效率和涂层结合强度都大大提高。

⑤ 气压　压缩空气的气压影响雾化的金属微滴的尺寸，增加气压会减小微滴尺寸。但微滴尺寸过小，受压缩空气的影响变大，氧化加重，冷却加剧，熔滴到达基模表面时温度很低甚至固化，撞击变形小，使得涂层孔隙率增加，涂层氧化程度严重。此外，熔滴由于飞行速度过快，撞击基模时会产生二次飞溅，也增加了涂层的孔隙率。因此电弧喷涂的气压不宜过大。

在上述工艺参数分析的基础上，通过大量实验确定了表 6.15-7 所示的电弧喷涂制模工艺中喷涂不同材料的工艺参数值。

表 6.15-7　电弧喷涂工艺参数

涂层	电极材料	电压 /V	电流 /A	气压 /MPa	喷涂距离 /mm
锌层	锌丝	28	210	0.65	200
铝层	铝丝	30	220	0.65	200
锌铝伪合金	锌丝、铝丝	30	210	0.65	200
锌铝合金	锌铝合金丝	30	200	0.65	200

3）背衬工艺　喷涂壳层达到厚度要求后，要对其进行背衬，以便增大壳层强度。电弧喷涂模具的背衬材料可以选择树脂砂、环氧树脂、高强度水泥、低熔点合金如铋锡合金等。当选用铋锡合金材料制作背衬时，可以在围好模框的锌合金壳层后面直接进行浇注，工艺简单，但成本较高。因此金属拉延快速模具常常选用环氧树脂背衬，工艺过程见图 6.15-26。

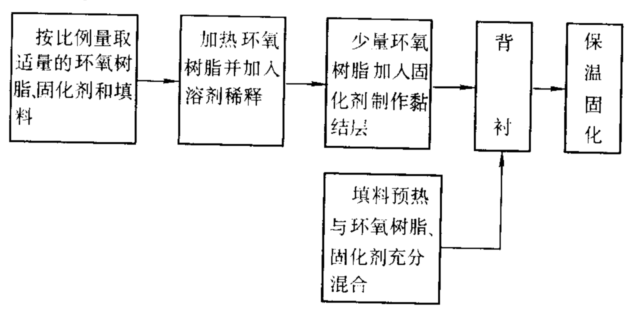
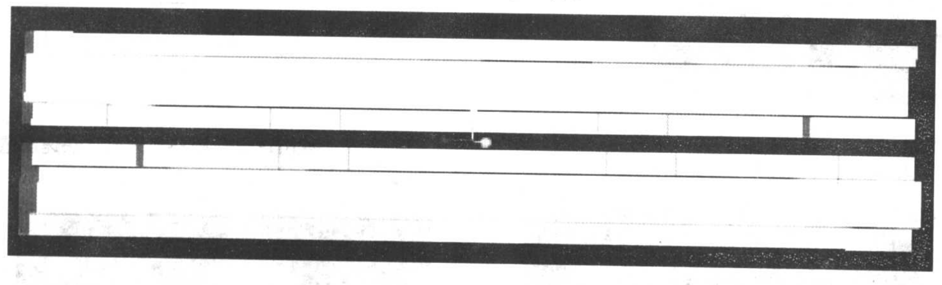


图 6.15-26　树脂背衬工艺框图

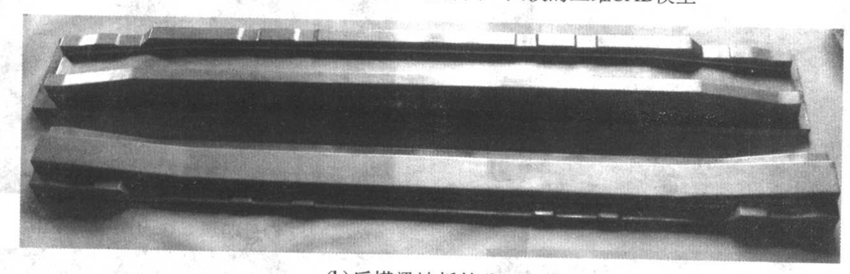


树脂背衬材料是由环氧树脂、固化剂和填料按比例组成的混合料。常用的固化剂有聚酰胺、乙二胺、多乙烯多胺等，但由于这些物质带有毒性，操作时要注意通风，做好防护。填料主要起到增加背衬强度的作用，填料含量多，则模具强度大。能用来作为填料的材料很多，比如铝粉、铝粒、铁粉、铁砂、石英砂等。制作时首先要把事先量取的环氧树脂加热到 40 ~ 50℃，加入 5% 的溶剂稀释，增加其流动性。然后从中取少量环氧树脂，按照 3:1 的比例加入固化剂，充分搅拌混合，均匀刷在锌合金壳层和模框内侧，反复刷几次，形成一定厚度的黏结层，并立即用压缩空气吹压刷涂在锌合金壳层上的环氧树脂，让环氧树脂和壳层充分接触黏结，提高黏结强度。通过制作黏结层可以增加锌合金壳层与背衬层的连接强度。之后，把预热到 60℃左右的填料，按重量比 3:1 的比例与环氧树脂混合，再加入相当于环氧树脂重量的 30% ~ 35% 固化剂，充分搅拌混合后注入模框中，压平端面，经初步固化后放入恒温机中固化成形。

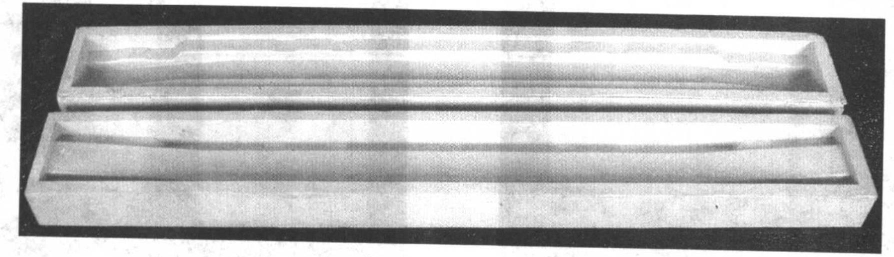
图 6.15-27 为采用电弧喷涂制模工艺制造的某型汽车的后横梁地板板筋件拉延快速模具，该零件的尺寸规格为 1 300 mm × 160 mm × 70 mm（长 × 宽 × 高），属于较为大型的冲压件。



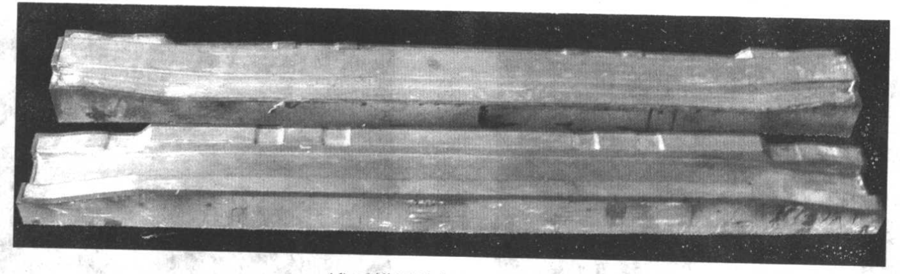
(a)后横梁地板件凸、凹模的三维CAD模型



(b)后横梁地板件凸、凹模原型



(c)后横梁地板件凸、凹原型的硅胶模



(d)后横梁地板件快速锌合金模具

图 6.15-27 采用电弧喷涂制模工艺制造的汽车后横梁地板板筋件拉延快速模具
（清华大学激光快速成形中心提供）

图 6.15-28 为采用电弧喷涂制模工艺制造的一个小型曲面零件的快速拉延模具（抛光后），锌合金表层厚度 6 ~ 7 mm，表面粗糙度达到 $R_a0.2\ \mu m$。

西安交通大学提出的基于 RP 厚型的电弧喷涂模具制造闭环反馈系统如图 6.15-29，其工作过程如下：①由 CAD 或快速反求系统给出初始设计，并将设计数据转换为 STL 模型；②由 RP 系统制造零件或模具原型，原型的材料根据具体的 RP 工艺而有所不同；③制造简易冲压模具：RP 原型不一定能直接用于电弧喷涂模具工艺，往往需要进行模型转换，如翻制石膏模、硅橡胶模等；④零件试冲压，进行质量及精度评价，对于金属板料成形件主要考察其开裂、起皱及回弹情况；根据评价结果提出模具修正方案；⑤将修正方案输入几何造型系统，开始新一轮设计、制造过程。

图 6.15-30 为西安交通大学选取 Audi 车门的 1:5 原型制造的模具及冲压件。

图 6.15-31 为清华大学激光快速成形中心与烟台泰利快

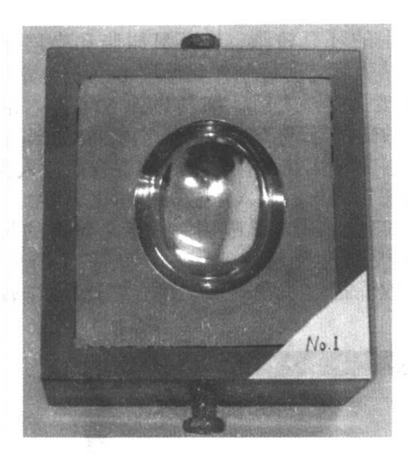


图 6.15-28　小型曲面零件快速模具半模
（清华大学激光快速成形中心提供）

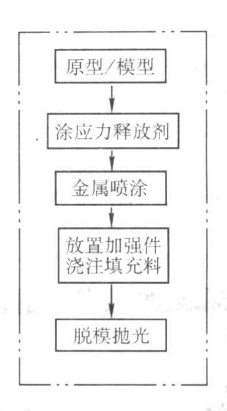
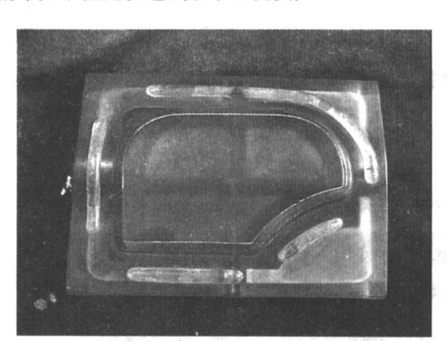
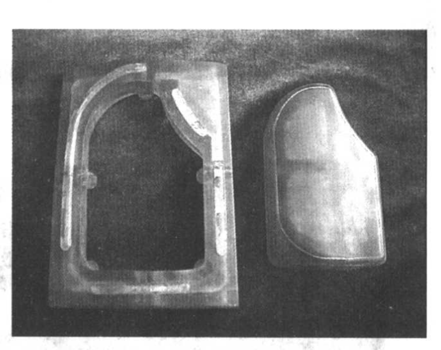


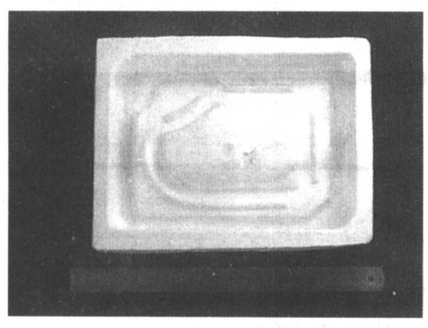
图 6.15-29　板料成形模具快速制造系统



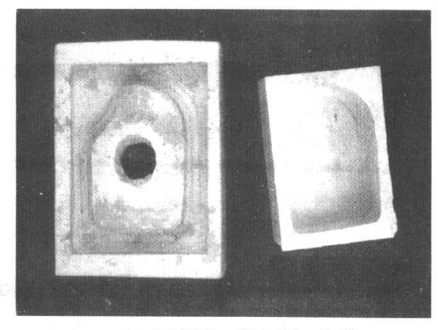
(a) 模具凹模树脂原型



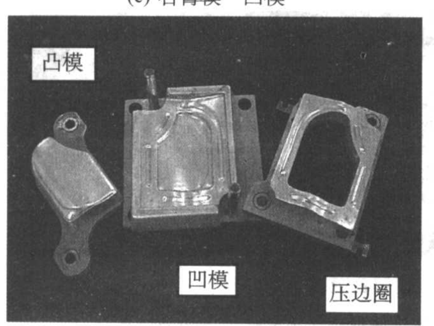
(b) 模具凸模、压力圈树脂原型



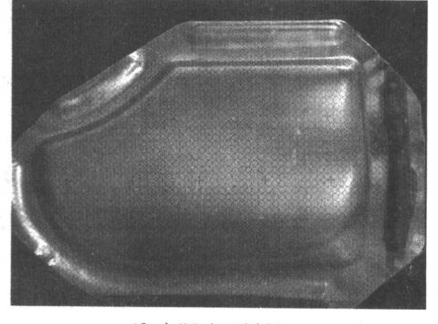
(c) 石膏模—凹模



(d) 石膏模—压力圈、凸模



(e) 电弧喷涂模具



(f) 实际冲压样件

图 6.15-30　Audi 车门的 1:5 原型制造的模具及冲压件

速模具有限公司采用快速模具技术制造的汽车覆盖件冲压件。

（2）基于 RP 原型的等离子原型喷射沉积模具制造

清华大学开发的基于 RP 的等离子金属喷涂沉积法制造模具的工艺流程如图 6.15-32 和图 6.15-33 所示，主要工序如下。

等离子金属喷涂制模工艺的步骤。

1）建立产品的三维 CAD 模型　模型的建立可以利用 CAD 软件或者利用三坐标测量机提供的数据。

2）制造快速原型　CAD 模型转换成 STL 文件，然后采用分层软件进行处理，得到的数据模型用于驱动 RP 成型系统（如 LOM、FDM、SLA 等）制造出快速原型。为了提高原型质量和精度，要对原型进行必要的后处理。

3）硅胶模制作　原型表面质量合格后，制作硅胶模。



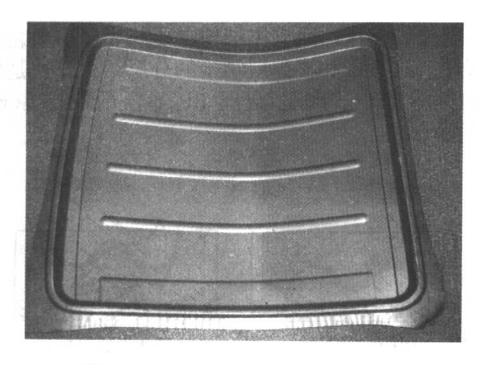


图 6.15-31　汽车覆盖件 1:1 冲压件
（清华大学激光快速成形中心提供）

4）基模制作　在硅胶模基础上翻制耐高温的无焙烧陶瓷基模。因为等离子喷涂产生的金属微滴温度很高，直接喷射在原型上会导致原型的变形、开裂甚至烧损而无法成型（原型材质一般为纸或塑料等不耐火材料），因此必须通过上述转换环节来制作耐高温陶瓷基模。

5）等离子喷涂沉积金属　在基模上用等离子喷涂工艺喷涂沉积不锈钢粉末等材料制造喷涂层。

6）电弧喷涂制作黏结层　当喷涂层厚度满足要求后，在喷涂层后面用电弧喷涂工艺喷涂制作黏结层。

7）背衬制作　因为喷涂层相对很薄，硬度虽然高，但强度不大，无法单独承受成型压力，因此必须给喷涂层背衬，加强支撑补充强度。

8）后处理及模具制作　打碎清除陶瓷基模，并与预先

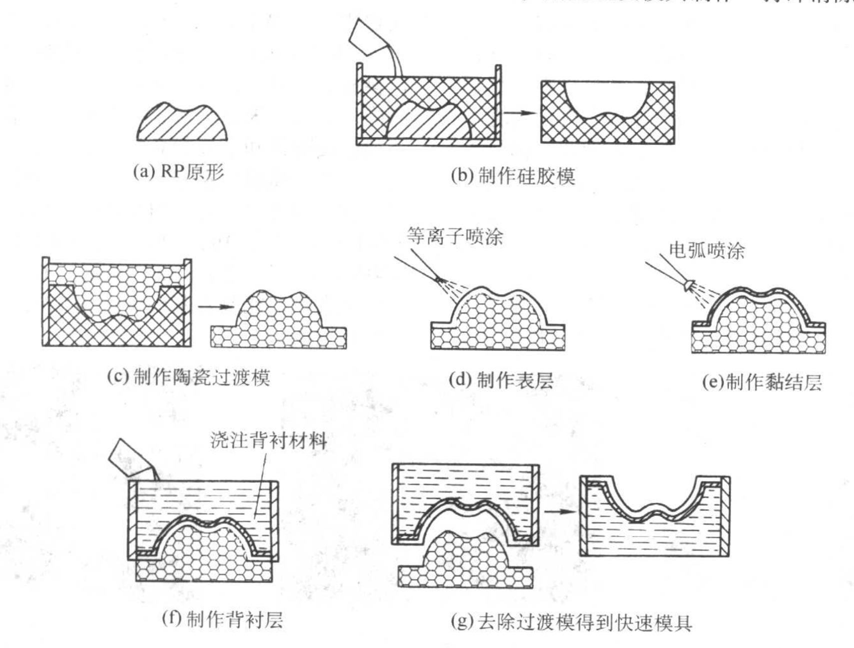


图 6.15-32　基于 RP 的金属喷射沉积制模示意图

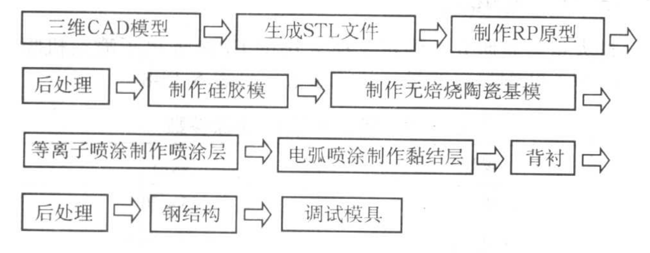


图 6.15-33　等离子喷涂快速模具工艺过程

加工好的钢结构件组装成快速模具，上压力机进行调整试模。

就不锈钢快速模具而言，该工艺制成的快速模具的基本结构可以分喷涂层、黏结层、背衬层和钢结构等四部分，见图 6.15-34。喷涂层由熔融的不锈钢金属微滴固化而成，精确拷贝了陶瓷基模的尺寸和形状，坚硬而致密，构成模具型腔表层，其厚度要求与模具的种类和承载情况有关。黏结层位于喷涂层下面，起到黏结喷涂层和背衬层的作用。一般可采用锌或锌合金做黏结材料，利用电弧喷涂方法喷涂在不锈钢层后面，厚度一般不大。黏结层后面是背衬层，主要起支撑和增加强度的作用。常用的背衬材料有树脂砂、环氧树脂、低熔点合金（如铋锡合金）等。如果模具需要调温，在浇注背衬材料前应在黏结层后面预设调温管道，然后浇注背衬材料，背衬凝固后调温管即被固定在模具中，因此这种方法可以根据模腔调温的需要设置任意复杂形状的调温管道，这是传统制模方法所无法比拟的。钢结构主要包括模架、镶嵌件等钢质构件。从上述分析可看出，该制模工艺将不锈钢等机械强度好、耐磨高的材料用于成形模具表面，而用成形工艺好、机械性能相对较差的锌合金、铋锡合金等材料制成背衬加固层，因此能够合理使用不同性能的材料，整个模具的材料从外到内呈功能梯度分布。

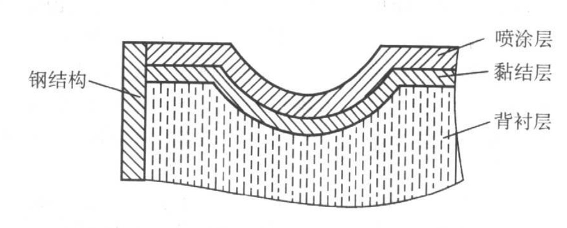


图 6.15-34　等离子喷涂模具基本结构

基于 RP 原型的等离子喷涂沉积金属模具制造工艺中关键的因素是：RP 基模的制造、等离子喷涂工艺及背衬工艺。

1）RP 基模的制造　由于直接沉积高温合金、黑色金属，因金属微滴温度高，RP 原型承受不了高温，因此需要由 RP 原型制造出具有较高尺寸精度的过渡型即 RP 基模。

目前国内外基模是整体灌注成形，整体为同一材料结构，要求对基模整体焙烧，这是提高其精度的最大障碍，也是国内外基模研制中共同的误区。事实上，对金属微滴可沉积性影响最大的仅是基模的表层，只要保证这一表层的特殊

物理、化学性能，而且当这一表层减至适当厚度后，会大大影响焙烧固化工艺，即仅需轻微地喷烧表面即可获得所要求的性能表层。仅仅喷烧表层，减少了基模固化的变形，提高了拷贝原型的精度。显然，薄表层作为壳体的整体强度是不够的，需要添加支撑，而支撑结构需要与表层牢固黏结，这就形成表层、过渡层和支撑层结构的分层结构，这是材料梯度结构的基本原理。陶瓷/金属 RP 基模的制造原理如图 6.15-35 所示。

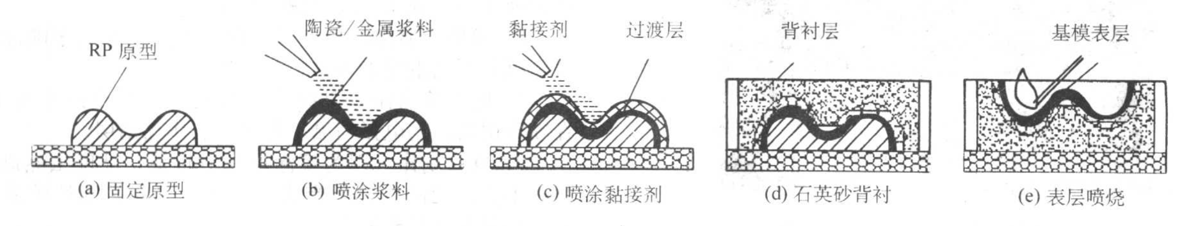
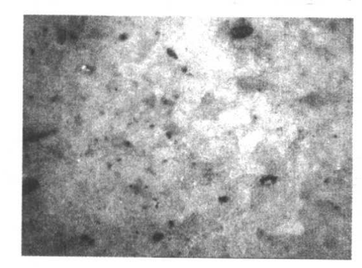


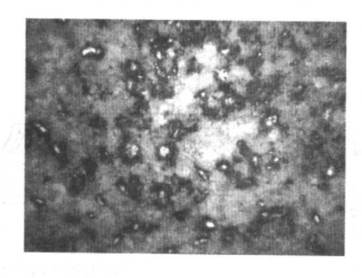
图 6.15-35　RP 基模制造原理

图 6.15-33 中基模表层由耐火度高、热膨胀系数小的陶瓷材料和金属粉、黏结剂、催化剂等构成的复合材料，其制造过程：首先由以上材料混合制成陶瓷/金属粉浆料，然后将浆料喷涂到 RP 原型上，浆料在原型的表面上快速固化后形成基模表层。表层不仅可精确地拷贝原型的形状，而且不占据原型的有效空间，陶瓷/金属浆料喷涂沉积的厚度对拷贝 RP 原型的精度无影响，因此具有尺寸精度高、复制能力强、表面光洁、表层强度高等特点。陶瓷/金属 RP 基模的表层的微观结构如图 6.15-36 所示。

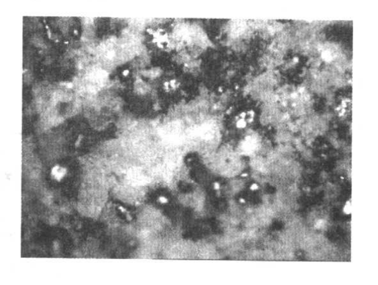
不含金属粉末的基模（图 6.15-36a）中黏结剂将陶瓷材料紧密连接在一起，熔融金属微滴与基模间的结合主要为机械和微扩散结合，很难沉积出较厚的金属壳层。图 6.15-36b）、6.15-36c）中深色相为金属粉末颗粒，浅色相为陶瓷材料和黏结剂。金属粉末均布在基模的整个表面并形成网状结构，金属粉末围绕陶瓷颗粒均布。基模表层的强度依靠黏结剂连接陶瓷和金属粉获得。熔融微滴可大量的与基模上均匀分布的金属颗粒相熔接，保证了金属微滴的可沉积性。X 射线衍射分析表明，基模表层已形成(Fe0.67Ni0.33)OOH、AlFe0.23Ni0.77、MoH1.19、Al0.9Ni1.1 等金属化合物和 (C4H6)n、C42H82O4、C8H14O4、(C14H10) n 和 C17H12O 等有机化合物，能改善基模中金属颗粒、陶瓷粉和黏结剂之间的结合性能。



(a) 陶瓷基模(700×)



(b) 陶瓷/金属基模 (300×)



(c) 陶瓷/金属基模 (500×)

图 6.15-36　陶瓷/金属 RP 基模的表层的微观结构

2）等离子喷涂工艺　等离子喷涂工艺制模的最大特点之一是能够喷涂不锈钢等高熔点金属来制造模具，模具硬度、强度高、成形精度好。制模的一个重要环节在于构成模具型腔表层的金属喷涂壳层的成形。因为模具的使用性能，不但与金属壳层的材料有关，还受到壳层的孔隙率、结合强度、硬度以及壳层厚度等多种因素的影响，尤其是壳层厚度非常重要，厚度越大，模具的刚度强度等力学性能越好。但喷涂不锈钢等高熔点金属材料，由于热应力的影响很大，涂层随着厚度的增加，热应力累积加大，很容易翘曲开裂，因此如何制成一定厚度的质量完好、无裂纹等缺陷的金属壳层是制模关键。

等离子喷涂成形过程中，涂层质量受许多工艺参数的影响，比如热源参数、材料参数、供给参数、操作参数以及环境参数等等，参数数量多达四十多个，而且这些参数间还相互影响，因此喷涂过程十分复杂，要获得高质量的涂层，喷涂工艺参数的分析优选是至关重要。

热源参数　热源参数包括气体压力和流量、弧电压和弧电流。电弧电压和电流直接决定了焰流的功率和温度，这些选择要确保金属粉末的良好熔化。功率过小，粉末熔化不良甚至不能熔化；功率过大，粉末受热过大，氧化烧损严重，细小粉末气化蒸发，较大粉末过分熔化，撞击到基模表面上呈现溅射状，从而降低了涂层的结合强度，也降低了粉末沉积率。气体压力和流量主要影响等离子焰流的电压和热焓。经过大量实验研究，确定了所采用的 GP80 等离子喷涂机喷射沉积不锈钢材料的最佳热源参数，见表 6.15-8。

表 6.15-8　等离子喷涂热源参数

参数	数值
电压 U/V	65 ~ 70
电流 I/kA	0.45 ~ 0.5
Ar 气压力 p/MPa	0.65 ~ 0.7
Ar 气流量 l/h	80 ~ 90
H_2 气压力 p/MPa	0.3 ~ 0.4
H_2 气流量 l/h	50 ~ 70

供给参数　主要包括喷枪送粉方式、送粉气流量、送粉速率等。喷枪送粉方式包括外送粉和内送粉两种方式。外送粉喷枪结构简单，喷枪不会被粉末堵塞，但粉末受热状态不良，受送粉气流的影响大，只有送粉气流大小合适时才能保证粉末被送入焰流高温区。内送粉方式粉末被直接送入枪膛中加热，粉末受热状态均匀，因此涂层质量要好，但喷枪结构复杂，且容易堵塞。送粉气的作用是把粉末输送给喷枪，其流量能够保证粉末畅通流动为宜，过大会降低焰流的温度，对于外送粉喷枪来说，过大的送粉气流量会把粉末吹到焰流之外，导致粉末受热不良甚至无法沉积到基模表面。送粉速率即单位时间内的送粉量，其大小要保证粉末的良好熔



化。当送粉速度与电源功率匹配时，粉末被加热和加速的状况较为理想，熔化状态好，金属微滴彼此间结合紧密，结合强度好，涂层质量好。送粉速率小，虽然粉末熔化状态好，但沉积效率低，送粉速率过大，粉末熔化不良，会出现未熔粉末，涂层质量差。

操作参数的选择　操作参数主要包括喷涂距离、喷涂角度和喷枪扫描速度等。喷涂距离不但影响金属粉末沉积率，使沉积率随着喷涂距离的增加而减小，而且影响金属熔滴的温度、速度、涂层温度以及涂层应力的分布进而直接影响涂层质量。喷涂距离过大，金属微滴飞行时间过长，冷却效应加剧，温度和速度下降，撞击基模时的变形小，因而会降低结合强度，增加壳层内气孔率，致使组织疏松，脆性增加。而过小的喷涂距离给喷涂带来的不良影响更大，它不但会使粉末在焰流中的加热和加速时间过小，动能小且熔化不良，结合强度下降，还会将过多的等离子焰流的热量传给已形成的涂层，使其局部温度迅速升高，涂层局部热应力过大，变形不均匀，引起涂层翘曲和开裂。研究表明，当喷涂距离为 200 mm 时，粉末沉积率较大，涂层温度上升较缓，容易获得质量较好的涂层。喷涂角度是指喷枪轴线和基模表面之间的夹角。喷涂角度越小，涂层孔隙率越大，结合强度越低。这是由于"遮蔽效应"引起的，遮蔽效应见图 6.15-37。喷涂时尽量做到喷枪与基模表面垂直，最小喷涂角度也不能低于 45°，实验发现，一个较为合适的角度范围是 60°～90°。喷枪移动速度是指喷枪在基模表面上的扫描速度。喷涂时，喷枪每扫描一次，涂层的厚度就增加一层，为了避免涂层温度上升过快，一次增加的涂层厚度不能太大，因此喷枪移动速度不能太慢、其大小应该保证涂层厚度增加合理，同时尽量使得涂层厚度分布均匀，涂层表面温度分布均匀，避免由于过小的喷枪移动速度引发的涂层局部过热产生的涂层损坏。

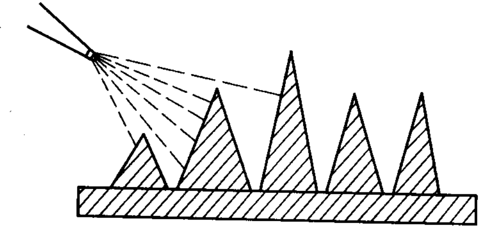


图 6.15-37　遮蔽效应

基模的预热　喷涂前通过预热使基模表面达到一定温度，喷涂时熔融的粉末撞击基模时不会产生因激冷导致的固化过快的现象，减小了粉末颗粒的收缩应力，有利于增加与基模表面以及颗粒之间的黏结强度，提高涂层质量和成壳性，还可以减少喷涂过程中基模的热膨胀造成的涂层应力。预热温度与喷涂材料、基模（或者待喷涂物体）材料以及喷涂面积的大小有关。预热的方法很多，比如炉内加热、表面喷烧、采用未送粉的等离子焰流喷烧预热等。

涂层温度控制　涂层温度是指喷涂过程中涂层的瞬时温度。涂层局部温度过高容易引起涂层翘曲开裂，喷涂过程中涂层的破坏往往与这个温度有关。涂层温度增加的主要热量来源一个是高温金属微滴的热传递。喷涂过程中高温金属微滴撞击基模后释放的热量，一部分散失到外界环境，一部分传给涂层，随着涂层厚度的增加，热量迅速累积，导致涂层温度上升；另一个是等离子焰流的加热作用，喷涂时等离子焰流的热量主要用来加热喷涂粉末，但不可避免地会有一部分热量要传递给喷涂层，喷枪离喷涂层越近，焰流对涂层的加热作用越大，涂层温度上升越快，这种焰流的影响使得成形过程对温度变化很敏感，往往导致涂层瞬间出现局部过烧过热，进而开裂损坏，成形失败。影响涂层温度的主要参数有喷涂距离、连续喷涂时间和喷枪移动速度等因素。实验中，定量研究了喷涂距离、连续喷涂时间对涂层温度的影响，分别选取 100 mm、150 mm 和 200 mm 三种喷涂距离，连续喷涂时间为 30 s，每隔 5 s 采用红外线测温仪测量一次涂层温度，测量结果见图 6.15-38。结果表明涂层温度会随着连续喷涂时间的增加而迅速上升，当喷涂距离为 200 mm 时，涂层温度上升较缓，当喷涂距离为 100 mm 时，涂层温度上升最为迅速。

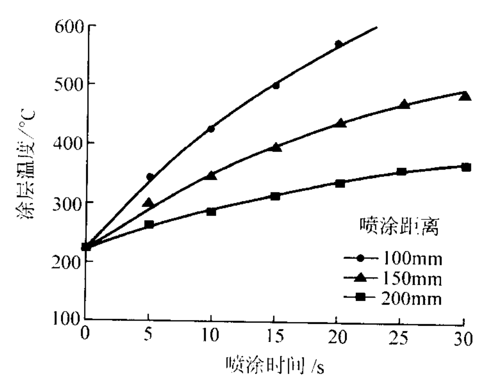


图 6.15-38　涂层温度与喷涂距离和喷涂时间的关系

因此，要形成一定厚度的无翘曲开裂等缺陷的涂层，喷涂过程中必须有效控制涂层温度，使之保持在一个合理的范围内。为控制涂层温度，喷涂成形不锈钢模具过程中可以采取以下措施。

适当调整喷涂距离，采用变距离喷涂　喷涂初期形成的金属壳层很薄，既脆弱又不稳定，经不起高温高速的等离子焰流的加热和吹压，因此喷涂开始时采用较大的喷涂距离，待涂层达到一定的厚度（比如 1 mm 左右）后，再拉近喷涂距离，调整到 200 mm。这种喷涂距离的调整不仅可以有效避免喷涂初期等离子焰流对涂层的不利影响，而且还能确保喷涂过程中涂层温度上升缓慢，提高壳层的成形质量。

控制连续喷涂时间　当基模不是很大时，其散热能力有限，不能长时间连续喷涂，以免涂层温度上升过快，应该采用间歇喷涂方式。间歇时间应该根据涂层温度测量结果适当加以调整。

采取涂层冷却措施　在喷涂过程中利用压缩 CO_2 气体或者压缩空气对涂层冷却降温，使涂层温度保持在 200～250℃范围内。

另外，喷涂时基模周围不要设置较高的围框，也不要直接放置在无栅格的工作台面上，以免产生涡流，高速涡流影响金属微滴的沉积，还会将壳层与基模吹开，破坏成形精度。

通过对上述工艺参数的分析，结合优化实验，确定了用 GP80 等离子喷涂设备和外送粉喷枪喷涂不锈钢材料所用的工艺参数，见表 6.15-9。

表 6.15-9　等离子喷涂工艺参数

参数	数值
电压 U/V	65～70
电流 I/kA	0.45～0.5
Ar 气压力 p/MPa	0.65～0.7
Ar 气流量 l/h	80～90
H_2 气压力 p/MPa	0.3～0.4
H_2 气流量 l/h	50～70
送粉速度 v_s/g·min^{-1}	74.5
喷枪移动速度 v_p/mm·s^{-1}	100～200
喷涂距离 d/mm	200
喷涂角度 θ/（°）	60～90



国内外先后开发出了等离子喷涂机器人，采用机器人控制喷涂过程，提高喷涂过程的自动化程度，排除人为扰动。国外一种先进的热喷涂机器人喷涂设备，可以采用4~6个喷头同时喷涂，用包含红外照相机在内的热传感器检测喷涂温度，用热补偿软件控制喷涂单元的PLC，喷涂过程稳定，成形质量良好。

3）金属背衬工艺　为保证制造的金属模具具有较好的力学性能、尺寸精度，需要对金属壳背衬。背衬时可以浇注混有铝粉的环氧树脂或熔融金属，对于需要冷却管道的模具，首先铺设管道，然后再背衬，保证壳层与背衬材料紧密结合，从而保证模具的性能和精度。

考虑到铋锡合金熔点低、流动性好、凝固时体积膨胀（膨胀率为0.05%），可减少壳层的变形，可提高壳层与背衬层之间的结合强度，故选用该合金作为背衬材料。但试验发现铋锡合金直接背衬壳层存在分层现象。为此提出梯度背衬原理即在背衬过程中从材料的熔点、浸润性、强度等方面实现合理的梯度，层与层之间形成化学键结合，克服金属壳层与背衬材料之间的分层问题，实现壳层的金属梯度背衬。

考虑到锌合金的熔点介于不锈钢和铋锡合金之间，且锌可与铋、锡形成三元共熔相图，因此选择锌合金作为金属壳层与背衬层之间的过渡材料。锌合金采用电弧喷涂的方法直接喷涂到金属壳层上，进一步增加金属壳层的强度和厚度，然后再浇注铋锡合金背衬壳层，模具断面结构见图6.15-39。

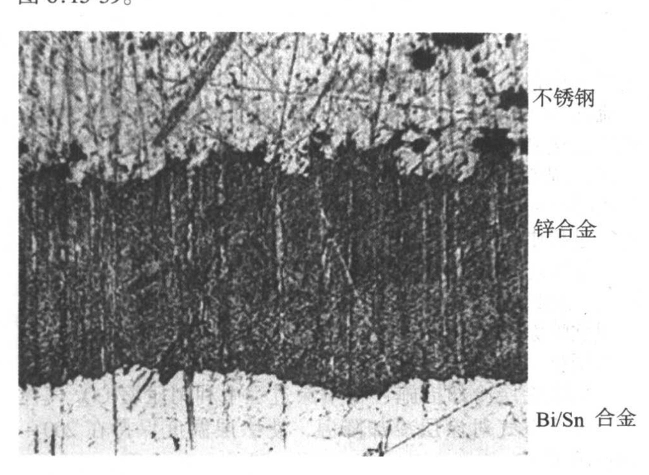


图6.15-39　不锈钢快速模具断面各层结构状态形貌　（300×）

运用等离子喷涂制模工艺，完成了一个具有复杂曲面形状的板材零件的不锈钢快速模具的试制。图6.15-40是喷涂制成的该零件的不锈钢快速模具的凹模，其中不锈钢喷涂层的厚度达10 mm，图6.15-41是该模具的不锈钢喷涂层。将该模具从中间剖开，观察模腔截面，图6.15-42是模腔的截面图。从该图中可以看出，该模具型腔由三层组成，即不锈钢模腔表层、锌合金粘结层和铋锡合金背衬层，层次清晰，梯度分布。测量结果表明，不锈钢表层成形质量好，尺寸精度高，组织紧密，孔隙率低，具有良好的结合强度。图6.15-43分析了模具截面各层之间的结合状况，可以看出不锈钢喷表层、Bi/Sn合金背衬层与锌合金黏结层之间紧密结合，黏结状况良好，因此不锈钢喷涂表层得到了良好支撑和加固，模具整体具有很好的机械强度。

在HR－150A洛氏硬度计和MH－3型显微硬度计对不锈钢表层进行了硬度分析。表6.15-10中的测量结果表明，模具表层硬度分布均匀，宏观硬度平均值达到HRC34.4，而电弧喷涂制造的锌合金快速模具表面硬度只有HB120左右，因此该种模具比中低熔点合金模具具有更好的耐磨性和成形质量，其使用寿命也大大提高。

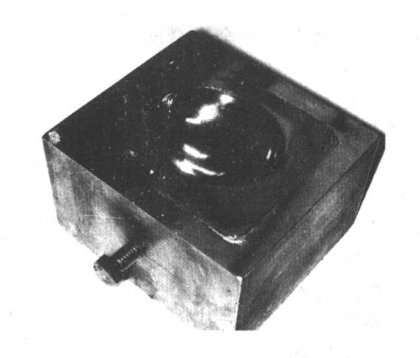


图6.15-40　复杂曲面零件的不锈钢快速模具凹模
（清华大学激光快速成形中心提供）

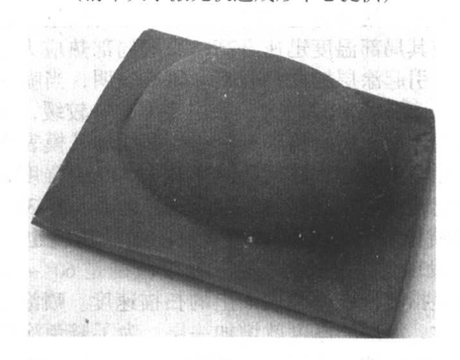


图6.15-41　不锈钢快速模具的等离子喷涂层
（清华大学激光快速成形中心提供）

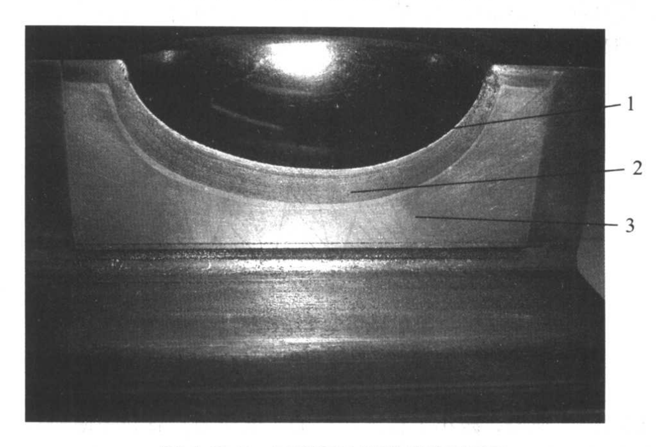


图6.15-42　不锈钢快速模具截面图层
（清华大学激光快速成形中心提供）
1—不锈钢表层（厚度10 mm）　2—锌合金黏结层
3—铋锡合金背衬

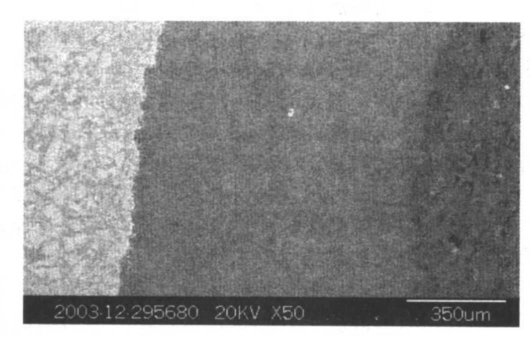


图6.15-43　等离子喷涂不锈钢快速模具截面SEM图



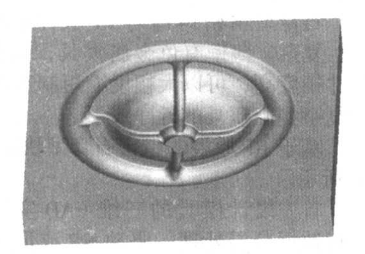
表 6.15-10　不锈钢喷涂层硬度测量结果

测试点	宏观硬度 HRC	显微硬度 HV_{03}
1	35.4	752.3
2	34.4	781.9
3	36.2	738.2
4	33.5	787.1
5	32.2	757.1

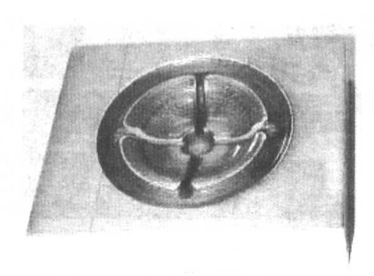
图 6.15-44 为采用等离子喷涂工艺制造的汽车方向盘模具的凹模。

3.2.2　精密铸造成形

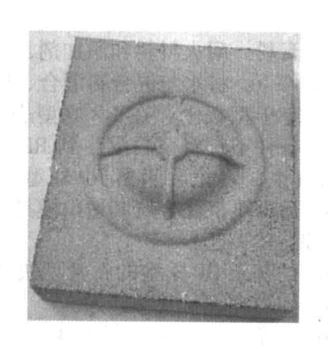
RP技术与铸造技术相结合，是 RP 原型转化为金属制品快速、低成本的工艺方法，但尺寸精度问题是困难所在。典型的 RP 工艺转化为金属件的方法对比如表 6.15-11 所示。



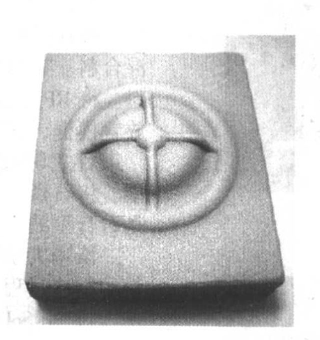
(a) CAD 模型



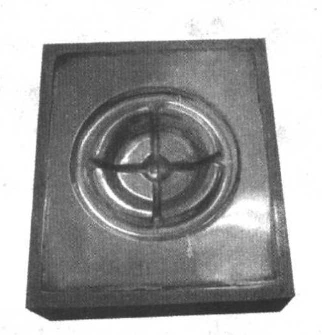
(b) RP 原型



(c) RP 基模



(d) 金属壳层



(e) 不锈钢模具

图 6.15-44　金属喷射沉积制造的方向盘模具的凹模（清华大学激光快速成形中心提供）

表 6.15-11　基于 RP 的铸造法制造金属零件/模具

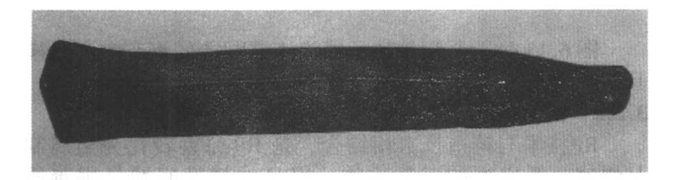
RP 工艺	最佳的工艺路线	适应范围
SL	SL + 熔模/消失模铸造	中小型、复杂件
LOM	LOM + 石膏型/砂型/陶瓷型铸造	各尺寸规格的中等复杂件
SLS	蜡型 + 熔模铸造，SLS 砂型直接浇注成形	中小型复杂件
FDM	FDM + 熔模/消失模铸造	中小型中等复杂件
3DP	砂型直接浇注成形	中小型复杂件

采用精密铸造的方式得到快速零件/模具有许多方法。典型工艺主要有：QuickCast 工艺由美国 3D Systems 公司推出。它利用立体光刻（SL）工艺获得半中空 RP 原型，然后在原型的外表面挂浆，得到一定厚度和粒度的陶瓷壳层，紧紧地包裹在原型的外面，再放入高温炉中烧掉 SL 原型，得到中空的陶瓷型壳，即可用于精密铸造。浇铸后得到的金属模具还要进行必要的机加工，使得其表面质量和尺寸精度达到要求。该方法的优点是用 SL 原型直接替代蜡模，从而可以提高铸型的精度，并缩短制造周期。缺点是在陶瓷型壳焙烧阶段，经常会因 SL 原型的膨胀使陶瓷型壳产生裂纹甚至破裂。另外，无法保证每一件 SL 原型都浇注成功获得金属件，一般只适合于单件制造。该工艺的详细介绍见第 16 章。

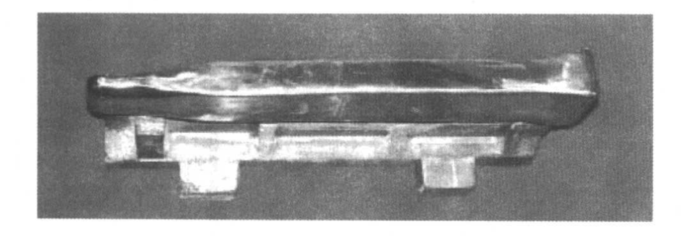
以铸造用的陶瓷粉末或型砂为原料，CAD 模型直接驱动原型机制成铸造用的型壳。在 CAD 环境中，直接将零件模型转换为壳型，再配以浇冒口系统。型壳的厚度可取 5 ~ 10 mm，烧结或粘接过程中，非零件部分进行烧结或粘接，零件部分仍是粉末。造型完成后将粉末倒出，再经固化处理就获得铸造用的型壳。用此方法，省去传统精密铸造过程中蜡型、泡沫塑料模、木模的制作等多种工艺过程，是传统铸造过程的重大变革。一般一个壳型只能使用一次。目前典型的 CAD 直接铸型工艺主要有无模铸型制造工艺 PCM（Patternless Casting Modeling）、SLS 工艺、3DP 工艺、GS（Generis sand）工艺等。这一部分的具体内容见第 16 章。

无焙烧陶瓷型制造工艺以 RP 原型或转化的硅胶模为母模，翻制陶瓷型，喷烧后即可用于浇注金属成形。适合于各类合金的模具制造。图 6.15-45 为采用该工艺制造的模具。

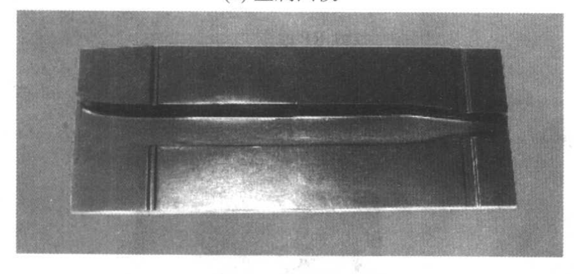
基于 RP 原型的无焙烧快速自硬化非占位涂层制造工艺，或称涂层转移法，工艺流程如图 6.15-46、图 6.15-47 所示。其原理主要是以 RP 原型或硅橡胶模为模样，采用硅酸乙酯水解液作为粘结剂，以不同粒度级配的莫来石粉为耐火材料，添加催化剂和适量增稠剂，制造成的涂料可以直接喷涂到模样上，喷涂厚度控制在 0.5 ~ 1 mm。在涂层的背面添加非金属背衬即 CO_2 硬化水玻璃石英砂，背衬与涂层硬化后，移去模样，对表层立即喷烧，然后将熔融的高温金属可以直接浇入到铸型中，即可制造出具有较高尺寸精度、较好



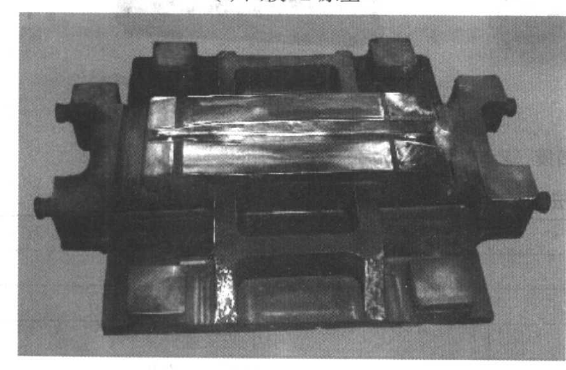
(a) 凸模 RP原型



(b) 金属凸模



(c) 凹模 RP原型



(d) 金属凹模

图 6.15-45 汽车上梁覆盖件快速精密铸造模具
(清华大学激光快速成形中心提供)

表面质量的金属模具。

非占位涂层法制造工艺主要步骤如下：①在 RP 原型上涂刷脱模剂，确保脱模剂均匀成膜。②使用涂料喷枪直接在 LOM 原型或硅橡胶模上喷涂自硬转移涂料，控制好合理的喷涂工艺参数，涂料厚度 0.5 ~ 1 mm，然后再在涂料上喷涂一层黏接剂。③采用水玻璃砂背衬造型，吹 CO_2 气体硬化；④涂料与砂型建立结合强度后，取出 RP 原型。涂层便转移到砂型上，并清晰地复制出模样的表面形状，得到带有涂层的砂型。⑤立即喷烧铸型后，合箱浇注，即可制造出金属模具。图 6.15-48 为采用该工艺制造的低熔点金属模具。

石膏型以石膏混合料的浆体灌浆成形，浆体的流动性很好，又在真空下充填，其成形性能优良，一次灌浆即可获得铸型，制造周期短，工艺简单。浆料在凝结过程中又有轻微的膨胀，复模性优异、铸型精确、光洁，这是其他精密铸造方法无法比拟的。

石膏型精密铸造与 RP 技术相结合，可以用来铸造精密、复杂、薄壁有色金属模具，铸出的模具表面粗糙度低、尺寸精度高，可以大幅度缩短制造周期、降低成本，可以实现复杂型腔模具的近净成形。

基于 RP 原型的精密石膏型快速制造工艺路线如图 6.15-49 所示。

首先设计模具的三维 CAD 实体模型，获得 STL 文件，进行数据分层处理，驱动 RP 成形系统制造出 RP 原型。原型经表面处理后，对其进行尺寸检测，若合格则可用于石膏型精密铸造。若模具的结构复杂、起模难度大，则制造硅橡胶模具。

按比例称量石膏粉、耐火材料和添加剂，混合成为石膏混合料。在真空条件下，将水与混合料混合、搅拌成石膏浆料。将 RP 原型固定于型板上，在 RP 原型表面涂脱模剂，放置模框，在真空条件下，将浆料灌注到 RP 原型上，灌浆结束后立即破除真空，硬化后起出 RP 原型，即得到石膏型。将石膏型烘干后即可浇注金属制造出模具。其技术关键是石膏型的配方和造型工艺。

清华大学提出的基于 RP 原型的石膏型快速制造金属模具的制造过程为：

1）用 Solidworks 等软件系统进行 CAD 模型造型（如图 6.15-50a），CAD 设计需要 8 h；

2）在 M－RPMS－Ⅲ 设备上制造 LOM 原型（图 6.15-50b），850 层，成形时间 28 h，起型、打磨后处理原型需要 24 h；

3）按比例称量硅橡胶的双组分材料，并混合搅拌，在 MKV－1 真空注模机上制造出硅胶模（图 6.15-50c），制造周期 12 h；

4）按比例称量石膏混合料和水，在真空灌浆设备上制备石膏型（图 6.15-50d），制造周期 20 h；

5）采用涂层转移法制造上箱（图 6.15-50e）；

6）将石膏型芯采用水玻璃砂固定在下箱，合箱浇铸，即可制造出金属模具（图 6.15-50f），需要 8 h。

总共制造周期需要近 100 h，即大约一周的时间可以快速制造出模具。

清华大学激光快速成形中心和北京殷华激光快速成形及模具技术有限公司合作，采用 LOM 工艺制造的 RP 原型，通过上述 RP－陶瓷型工艺获得精密陶瓷型，浇注黑色金属制作的子午线轮胎模如图 6.15-51。图 6.15-51a 为轮胎的 LOM 原型，图 6.15-51b 为硅橡胶模，图 6.15-51c 为精密陶瓷型，图 6.15-51d 为合金铸铁模具。

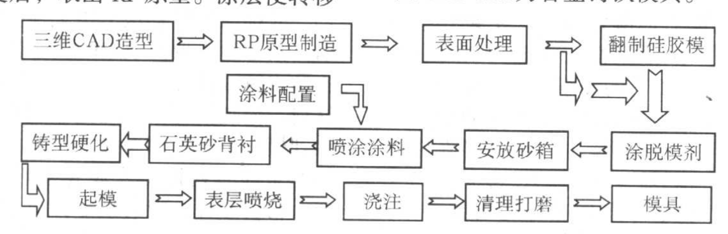


图 6.15-46 基于 RP 原型的非占位涂层快速模具制造工艺流程



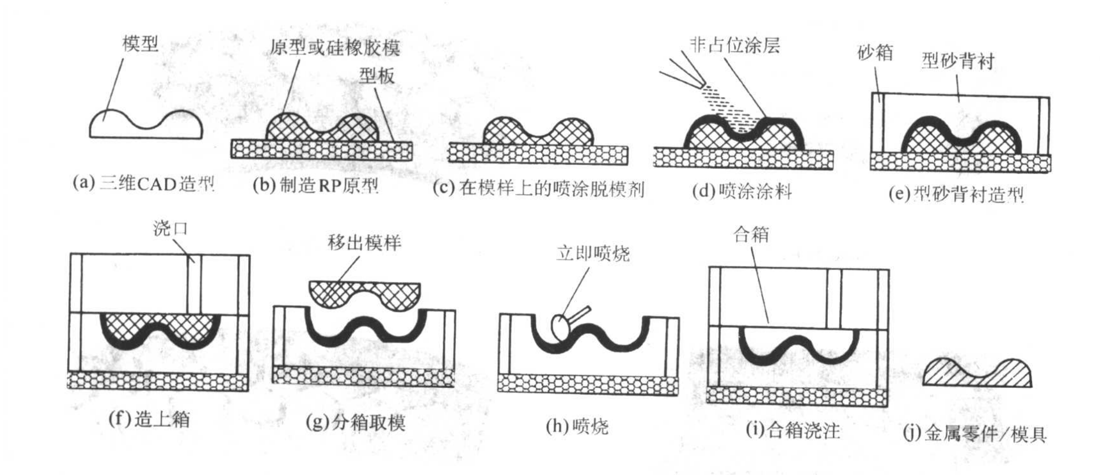


图 6.15-47　基于 RP 原型的非占位涂层快速制造流程示意

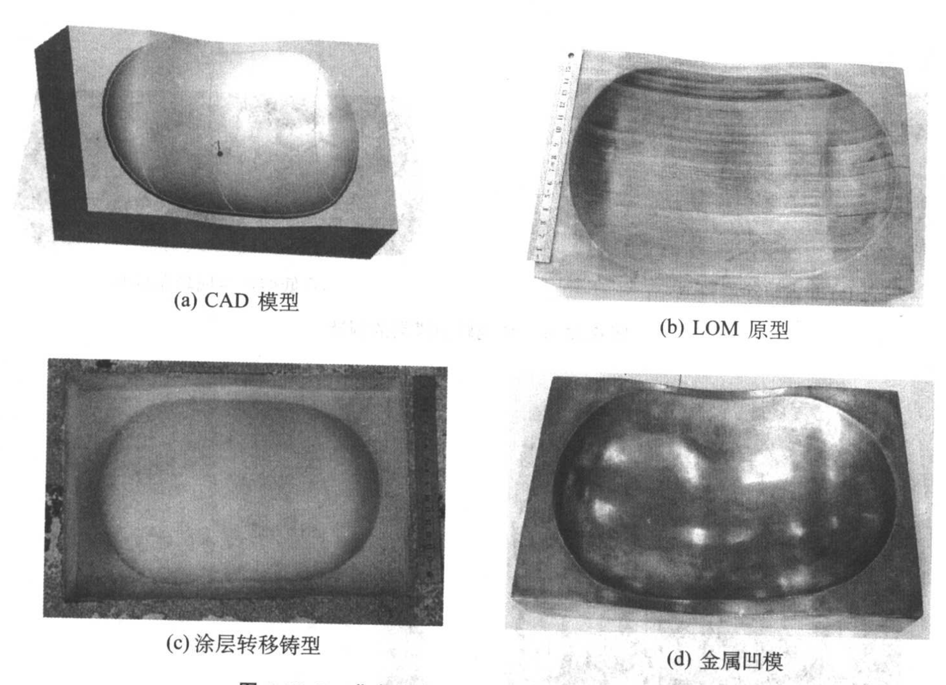


图 6.15-48　非占位涂层法制造的自由曲面金属凹模

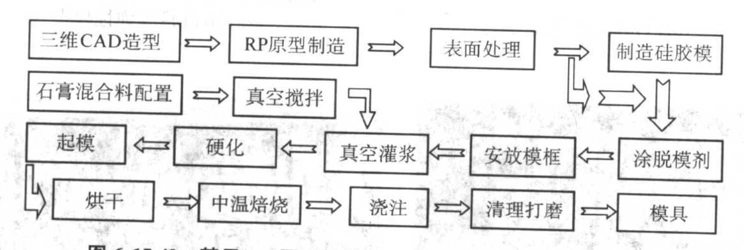


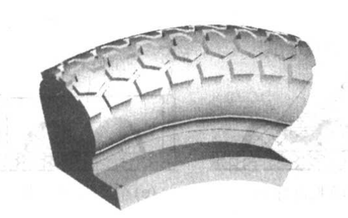
图 6.15-49　基于 RP 原型的精密石膏型快速模具制造工艺路线

通过对各种精密铸造制模方法进行比较，陶瓷型铸造、砂型铸造和真空铸造适合于中大型模具，石膏型铸造适合于中小型模具制造，熔模铸造更适合于小型模具制造。其比较如表 6.15-12 所示。

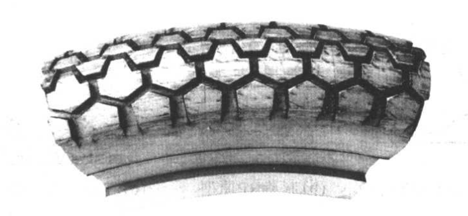
3.2.3　电铸成形

电铸成形是一种快速原型和传统电铸相结合的制造技术。国内清华大学、西安交通大学、南京航空航天大学等单位开展了有关研究。该工艺的基本过程为：首先对 RP 原型表面进行必要的处理，如打磨、抛光、涂敷导电层等，然后置入电铸槽中，以 RP 原型做阴极，以电铸材料的金属板做阳极，金属盐溶液作为电铸溶液。通过常温电铸获得金属壳层，该壳层的内表面精确地复制出了 RP 原型的外形，通过高温烧结去除金属壳内的原型，然后在模具框和金属壳外侧之间浇铸低熔点合金或铝粉－树脂混合材料背衬，即可得到

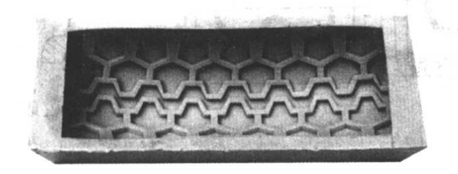




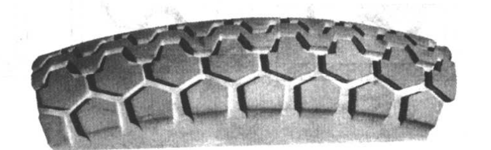
(a) 三维CAD模型



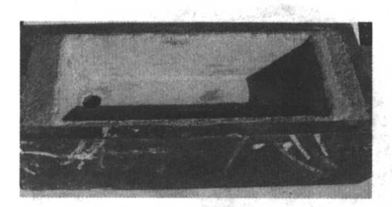
(b) LOM 原型



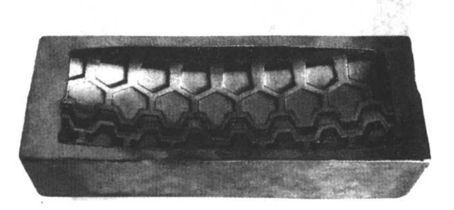
(c) 硅橡胶模具



(d) 石膏型



(e) 非占位涂层铸型

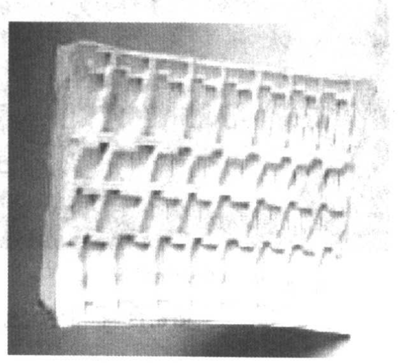


(f) 低熔点金属轮胎模具

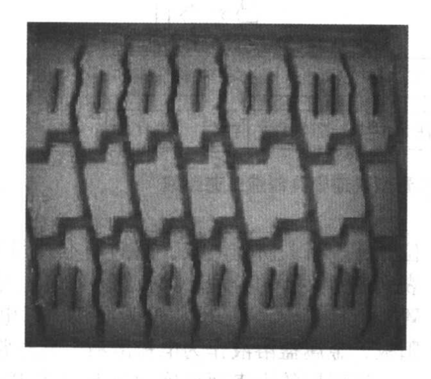
图 6.15-50　金属轮胎模具的制造



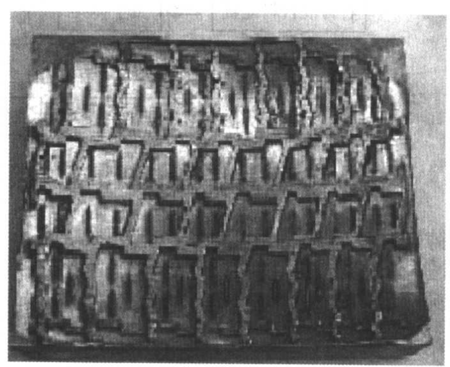
(a) LOM 工艺原型



(b) 硅橡胶弹性模型



(c) 精密陶瓷型形貌



(d) 金属模具

图 6.15-51　子午线轮胎模（清华大学激光快速成形中心和北京殷华激公司提供）

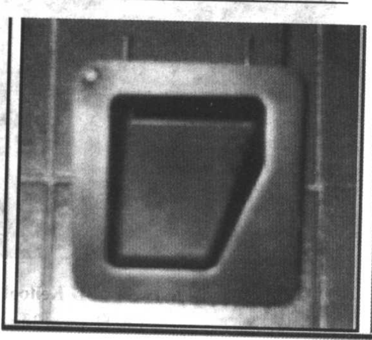
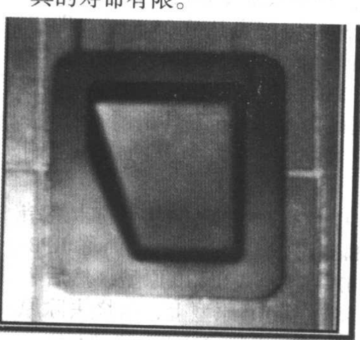


表 6.15-12　精密铸造制模工艺比较

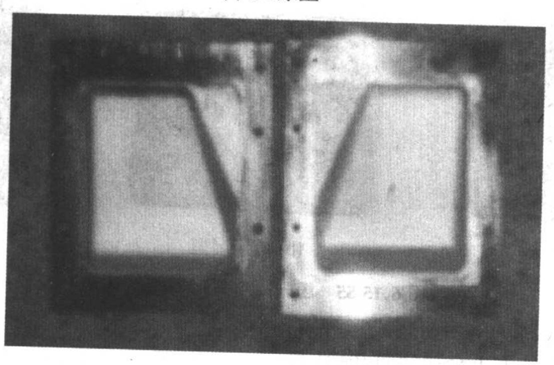
工艺方法	尺寸精度	表面粗糙度 $R_a/\mu m$	尺寸界限	复杂程度
熔模铸造	CT4 ~ 6	0.8 ~ 3.2	中小型模具	复杂模具
石膏型铸造	CT4 ~ 6	0.8 ~ 1.6	中小型模具	复杂模具
消失模铸造	CT5 ~ 7	1.6 ~ 6.3	各种模具	复杂模具
砂型铸造	CT5 ~ 8	3.2 ~ 12.5	各种模具	中等复杂
陶瓷型铸造	CT4 ~ 6	0.8 ~ 3.2	大型模具	中等复杂
真空铸造	CT5 ~ 7	1.6 ~ 3.2	大型模具	中等复杂

电铸件。电铸件可以是镍模具或 EDM 铜电极。

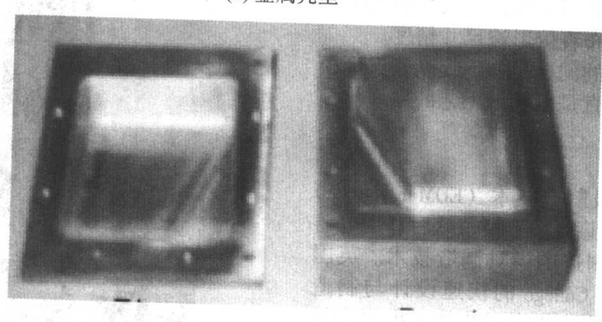
澳大利亚昆士兰州理工大学开发出基于 SL 工艺的电铸成形制模技术，其工艺过程是首先制造 SL 原型，然后根据 SL 原型制造出硅橡胶模具，电铸成形出镍金属壳，最后安放金属框架和铝粉增强的环氧树脂背衬金属壳层形成模具，可用于压制成形 0.5 ~ 0.8mm 的铝板。成形的模具如图 6.15-52 所示。图 6.15-53 为清华大学制造的航天飞机电铸模。电铸成型制造模具的优点是精度高，其缺点是成形速度慢，模具的寿命有限。

(a) SL 原型



(b) 金属壳型



(c) 电铸模具

图 6.15-52　电铸成形制模（来自参考文献 46）



图 6.15-53　航天飞机电铸模（清华大学激光快速成形中心提供）

3.2.4 粉末冶金成形

粉末冶金成形快速制造是 RP 技术与粉末冶金技术相结合，实现金属零件/模具快速制造的工艺。典型工艺有：

美国 3D Systems 公司推出粉末冶金快速制造工艺 3D Keltool™。其工艺路线是：首先用 SL 原型制造出硅胶模作为中间转换模，然后将混有树脂黏结剂的工具钢粉末灌注到中间模具中，待材料固化后取出得到模具生坯，通过烧结去除黏结剂，得到内部疏松结构（约 30%孔隙率）的模具熟坯件，最后经过渗铜处理增加材料的致密度和机械强度，通过简单机加工进一步保证模具的精度（可达 0.04 mm），即得 Keltool 模具。该模具 70%为钢，30%为铜，其特性与 P20 工具钢模具类似，可承受 20，000～25，000Pa 的压力和 650℃ 的高温。3D Keltool 模芯使用硬合金或 A6 工具钢两种材料，模具寿命可以达到 10 万次。图 6.15-54 为 3D Keltool 工艺制造的模具。

美国 Drexel 大学的 Jack G. Zhou 等推出的基于粉末烧结的制模工艺（Rapid Pattern Based Powder Sintering，简称 RPB-PS），其工艺路线是根据 CAD 模型制造出 RP 原型，然后将表面包有黏接剂的金属粉，灌注到 RP 原型上，焙烧去除原型获得半成品制件，然后进行（20～1 100℃）9 h 烧结和铝合金浸渗处理，制造成金属制品，其关键问题是黏接剂必须具有较高的耐热稳定性和耐高温变形性。美国 Timothy J. Weaver 等人采用粉末烧结技术制造的金属模具的硬度超过 HRC35，收缩率为 0.4%，制造的薄壁件如图 6.15-55 所示。

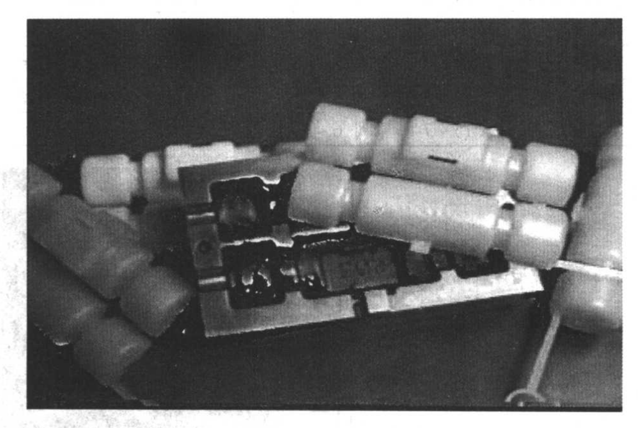
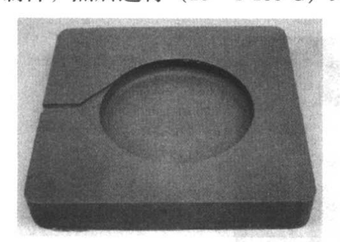
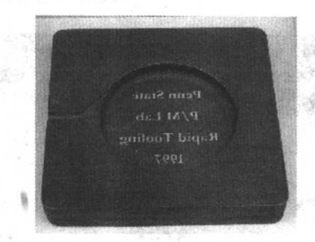


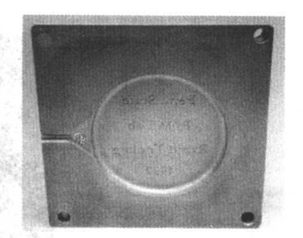
图 6.15-54 3D Keltool 工艺制造的模具
（来自 www.3dsystems.com）



(a) RP 原型



(b) 粉浆湿型



(c) 金属制件

图 6.15-55 粉末冶金成形制造模具

新加坡南洋理工大学 C. Ainsley 等人采用粉浆成形（slip casting）制造技术与 RP 技术相结合，用于金属零件/模具制造。研究了金属烧结温度和烧结时间对零件的尺寸精度的影响，并指出不锈钢粉末的颗粒分布直接影响尺寸精度。

金属粉末烧结成形制模主要的问题是如何提高和保证模具的精度，但烧结变形、收缩一直是困扰该工艺的发展与商品化。

3.2.5 电加工电极成形

基于快速原型的电加工电极制造技术（EDM Electrode）是一种先采用快速原型技术制造除原型母模，然后利用电铸或电弧喷涂技术进行 EDM 电极制造的模具制造技术。英国 Buckinghamshire Chilterns University College 的快速设计与制造中心，利用 SL 和 ThermoJet 两种快速成形工艺加工出原型母模，然后通过电铸获得壁厚小于 1.5 mm 的铜电铸件，利用聚亚安酯和石英砂的混合物或低熔点铋锡合金进行背衬后，用作 EDM 电极。

丹麦理工大学尝试用喷涂法制造电极，但在应用中，发现电极的损耗率较高，不能适用于实际的电火花加工。

北京隆源自动成形系统有限公司基于 AFS－300 设备进行了 EDM 电极快速制模方面的研究。

国内大连理工大学、西安交通大学等单位都研究开发了基于 RP 原型的电极制造方法。西安交通大学研究和开发的 GET 石墨电极成形机（图 6.15-56）提供了一种振动研磨石墨电极加工方法。

GET 石墨电极成形机采用复形和振动研磨的原理直接成形 EDM 电极。其加工具有以下技术特点：三维整体石墨电极一次成形、精度高；成形无需刀具、无需编程；电极修复简单迅速；成型过程高度自动化；可用于复杂电极成形；操作简单、使用方便。它的成形不同于普通加工，是通过研具与工件的相对平动和不断进给而产生，工件成型表面是包络而成的。其具体工艺方法为：首先，准备一个与想要制造的电极尺寸大小相同的模型，然后将磨料和粘结剂的混合物浇注于模型上，待固化后，取出模型，剩下的磨料与粘结剂所制成的模具称为研磨模具，简称研具；接下来把研具安装到整体石墨电极研磨机上，当它向做圆弧平动的石墨块进给时，就在石墨块上研磨出所需电极，该电极的轮廓形状与研具相同，凹凸方向相反，与模型轮廓形状及凹凸方向均相同。

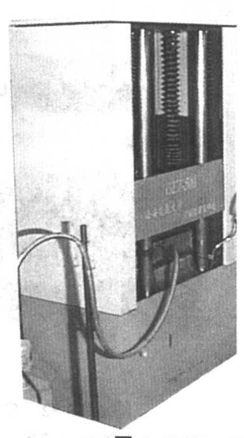


图 6.15-56 GET 石墨电极成形机
（来自 http：//smart.iamt.xjtu.edu.cn/cp/石 .htm）

编写：单忠德（中国机械科学研究院）
齐海波（清华大学）

第 16 章　铸型制造技术

1　基本概念及分类

在铸造生产中，模板、芯盒、压蜡型、压铸模的制造往往是用机加工的方法来完成的，有时还需要钳工进行修整，不仅周期长、耗资大，而且从模具设计到加工制造是一个多环节的复杂过程，略有失误就会导致全部返工。特别是对一些形状复杂的铸件，如叶片、叶轮、发动机缸体、缸盖等，模具的制造是一个难度更大的问题，即使使用数控加工中心等昂贵的设备，在加工技术与工艺可行性方面仍有很大困难。可以设想，如果遇到此类零件的试制或小批量生产，其制造周期、成本及风险是相当大的。如果将快速原型技术与铸造技术相结合，则可以很好地解决这一问题。

采用快速原型的离散 - 堆积成形原理与工艺完成铸型制造的技术与方法称为 RP 铸型制造。RP 铸型制造又可分为间接 RP 铸型制造和直接 RP 铸型制造，前者运用 RP 技术所完成的仅是铸型的原型，需经进一步地翻制和转换才能获得用于浇注的铸型，如硅胶型、石膏型和陶瓷型等，故称为间接 RP 铸型制造；后者运用 RP 技术直接完成可供浇注的铸型，如覆膜砂型、树脂砂型等，称为直接 RP 铸型制造。直接 RP 铸型制造又可进一步根据 RP 使能技术细分为微滴喷射 RP 铸型制造和激光束 RP 铸型制造两大类。本章所讨论的无木模铸造工艺（PCM 工艺）、直接壳型铸造工艺（DSPC 工艺）、GS 工艺和 Z Cast Direct Metal Casting 工艺均属微滴喷射 RP 铸型制造；基于 SLS 工艺的直接 RP 铸型制造、基于 SL 工艺的直接 RP 铸型制造和基于 LOM 工艺的直接 RP 铸型制造则属于激光束 RP 铸型制造。

微滴喷射直接 RP 铸型制造技术是指采用微滴喷射技术，在铸型 CAD 模型驱动下根据离散 - 堆积成形原理喷射树脂或其他黏结剂，黏结砂粒、陶瓷粉末等耐火材料堆积成形而完成铸型制造。它是一种直接 RP 铸型制造，即所获得的 RP 原型就是铸型，不需要进行翻制转换，由于采用了微滴喷射的 RP 成形工艺，故称为微滴喷射直接 RP 铸型制造当前比较成熟的微滴喷射 RP 铸型制造工艺有 4 种。

1）无木模铸造，即 PCM，它是 RP 技术与树脂自硬砂造型相结合的产物。该技术为清华大学激光快速成形中心与北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司共同研究，后者完成产业化并获得发明专利。

2）直接壳型铸型，即 DSPC（Direct Shell Production Casting），它是美国 Soligen Technology Inc. 采用美国麻省理工学院的 3DP 专利而开发的直接 RP 铸型制造工艺。

3）GS（Generis' RP Systems）工艺，它是德国 Generis GmbH 开发的直接 RP 铸型制造工艺，现已被美国 Extrude Hone 公司收购，被其子公司 Prometal 进行市场化运作。

4）Z Cast Direct Metal Casting 为美国 Z Corp 公司采用美国麻省理工学院的专利而开发的另一种直接 RP 铸型制造工艺。

采用激光技术作为 RP 的使能技术，在铸型 CAD 模型驱动下根据离散 - 堆积成形原理激光烧结覆膜砂、蜡粉等材料堆积直接完成 RP 铸型制造的工艺称为激光直接 RP 铸型制造。工业化大量应用的激光直接 RP 铸型制造可分为两大类，即：基于 SLS 工艺的直接 RP 铸型制造和基于 SL 工艺的直接 RP 铸型制造。前者主要有覆膜砂 SLS 铸型制造、直接 SLS 壳型烧结和 SLS 蜡型熔模铸型制造。后者最主要的工艺为美国 3D Systems 公司开发的 QuickCast 工艺。此外，处于试验室阶段的还有基于 LOM 工艺的直接 RP 铸型制造，即采用类似于消失模的铸造工艺，将 LOM 原型高温焙烧去除而获得铸型。

采用激光技术作为使能技术的直接 RP 铸型制造方法与采用微滴喷射技术作为使能技术的直接 RP 铸型制造方法相比各有优势。一般而言，基于激光的 RP 铸型制造比较容易达到较高的精度，工业界目前应用的激光直接 RP 铸型均属中小尺寸（一般小于 500 mm），成本较高且能量利用效率低下；而基于喷射技术的 RP 铸型制造的精度和尺度范围均较宽（100 ~ 1 500 mm），且成本低、能量利用效率高。最近，基于喷射技术的 RP 铸型制造的精度已经能满足铸造工艺对铸型精度的要求，其在直接 RP 铸型制造中的地位和应用将进一步得到提高和扩大。

间接 RP 铸型制造技术在快速模具一章中已经叙述了，因此，本章主要讨论基于微滴喷射（droplet jetting）技术的直接 RP 铸型制造和基于激光束（laser beam）的直接 RP 铸型制造技术。

2　基于微滴喷射的直接 RP 铸型制造

本节对上述 4 种微滴喷射直接 RP 铸型工艺进行讨论，其共性问题将一并放在 PCM 工艺中研究。

2.1　无模铸型制造工艺（PCM）

铸造工业中，采用砂型浇注熔化的高温液态金属以获得合格的铸件是主要的工艺方法，采用陶瓷型则是次要的工艺方法，前者约占 70%，后者仅占 30%。因而砂型的制造工艺是工业界，特别是金属成形加工界关注的重要工艺方法之一。砂型铸造广泛应用于汽车工业、机床工业、重型机器、航空工业、电机及气轮机、燃气机、造船等极为重要的工业领域。如何设计和制造性能优良的砂型（发气量小，耐火度高，强度高、溃散性和透气性好，成本低廉等）一直是学术界和工业界的研究课题。

传统的砂型制造工艺通过模样（木模、金属模、塑料模等）来获得砂型的尺寸、形状和精度，因而首先需根据铸件图设计模样，再通过加工、装配和检验等工序获得与铸件相对应的模样。考虑到生产和制造的成本和周期，一般采用的模样以木模为主。

由于木模的需要，使该工艺丧失了宝贵的“柔性”：即使只生产一个铸件，也需要设计制造一个木模，而木模的设计制造常需占用许多时间。特别是对大型铸件，木模的设计制造周期长，往往要占用 2 ~ 5 个月时间。造型（用木模和型砂完成可供浇铸的砂型之过程）需 5 ~ 10 天时间，浇铸 4 个小时（包括一定的辅助工作），清砂 2 ~ 3 天。可见木模的设计和制造占用了生产周期的绝大部分。对单件、小批量、多品种的铸造生产，特别是重型机械生产，木模制造是制约生产发展的主要因素。在大批量铸件生产的试制阶段（如汽车缸体，缸盖等铸件），由于产品尚未定型，更改结构和尺寸是极为普遍的，此时木模生产周期过长等问题对试制的制约是十分明显的，木模往往成为产品研发速度的限制因素之一。铸件生产的柔性化要求已成为工业界普遍追求的目标。省略木模，直接由铸型的 CAD 模型直接驱动机器而完成铸型制造，已成为一项紧迫的研发任务。

北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司与清华大学激光快速成形中心联合首创的无木模铸造技术（PCM）首次将快速成形技术应用于传统的树脂砂铸造工艺中。

2.1.1　PCM工艺的基本原理与特点

PCM工艺的基本原理如图6.16-1所示。首先从零件CAD模型得到铸型CAD模型。由铸型CAD模型的STL文件分层，得到截面轮廓信息，再以层面信息产生控制信息。造型时，第一个喷头在每层铺好的原砂上由计算机控制精确地喷射黏结剂，第二个喷头再沿同样的路径喷射催化剂，或者采用双喷头一次复合喷射技术按照截面轮廓信息同时喷射黏结剂和催化剂。两者发生交联反应，一层层固化型砂而堆积成形。黏结剂和催化剂共同作用地方的型砂被固化在一起，其他地方型砂仍为颗粒态的干砂。固化完一层后再黏结下一层，所有的层黏结完之后就得到一个空间实体。原砂在黏结剂没有喷射的地方仍是干砂，比较容易清除。清理出中间未固化的干砂就可以得到一个有一定壁厚的铸型，在砂型的内表面涂敷或浸渍涂料之后就可用于浇注金属。



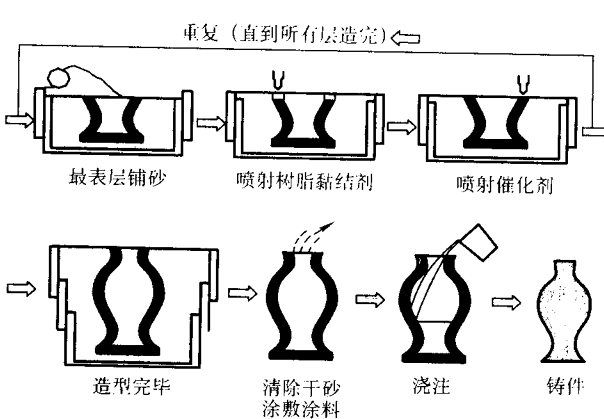


图6.16-1　无模铸型制造工艺原理示意图

同传统铸型制造技术相比，PCM工艺具有无可比拟的优越性，它不仅使铸造过程高度自动化、敏捷化，降低工人劳动强度，而且在技术上突破了传统工艺的许多障碍，使设计、制造的约束条件大大减少。具体表现在以下方面。

1）制造时间短　传统方法制造铸型必须先加工模样，无论是采用普通加工还是数控加工，模样的制造周期都比较长。对于大中型铸件来说，铸型的制造周期一般以月为单位计算。由于采用计算机自动处理，PCM工艺的信息处理过程一般只花费几小时至几十小时。另外，由于整个过程完全实现了自动化，基本上不需要考虑工人的劳动强度。因此，从制造时间上来看，传统造型方法无法与PCM工艺相比。

2）制造成本低　PCM工艺的自动化程度高，其设备的一次性投资较大，其他生产条件，如原砂、树脂等原材料的准备过程与传统工艺相同。对于一些大型、复杂铸件，如机床床身、大型模具等，木模的成本往往接近铸件成本的10%～30%，采用PCM工艺造型则具有较大优势，这类铸型的制造只需十几件或几十件就可收回设备投资。

3）无需木模　铸型的制造（造型）必须先有模样。模样一般用木材、塑料等材料由手工或机器加工而成，有时需要钳工修理，费时耗资，且精度不易保证。特别是对一些大型铸件，受加工设备的限制常采用手工刻模，质量难以保证；对一些形状复杂的铸件，例如发动机叶片、船用螺旋桨、汽车缸体和缸盖等，虽然目前有些模样的加工采用数控机床、仿形铣床等先进的设备和工艺，但木模的设计往往要多次修改才能成功，每次木模设计修改后又需重复全过程，形成工时与资金的浪费。PCM工艺仅需修改软件即可开始新一轮的试制，木模的设计制造、装配等在每一轮试制中均可省去。另外，对于单件生产，模样的加工成本和周期在整个铸件生产过程中所占比例过高。而PCM工艺则完全避免了传统铸型制造技术的这一最大缺陷，从而使砂型制造技术有了一个质的飞跃。

4）造型材料价廉易得　PCM工艺所使用的造型材料是普通的铸造用水洗砂和擦洗砂，价格低廉，来源广泛，而黏结剂和催化剂也是非常普通的化学材料，成本也不高。因此，对于国内外众多的树脂砂铸造厂家来说，该工艺不仅成本低廉，而且容易推广，因而具有很强的吸引力。

5）一体化造型　传统造型由于需要将木模从铸型中取出，所以必须沿铸件最大截面处（分型面）将其分开，也就是采用分型造型。这样往往限制了铸件设计的自由度，某些型面和内腔复杂的铸型不得不采用多个分型面，使造型、合型装配过程的难度大大增加，分型造型使铸件产生“飞边”，机加工量增大。而PCM工艺采用堆积成形原理，没有起模过程，因此完全可以采用一体化造型方法，即上、下型同时成形。一体化造型最显著的优点是省去合型装配的精确定位过程，减少设计约束和铸件裕量，节省金属和机加工量，使铸件的尺寸精度更容易控制。

6）型、芯同时成形　传统工艺出于起模考虑，型腔内部一些细微结构通常设计成型芯。型和芯分开制造，然后再将二者装配起来，装配过程需要准确定位，还必须考虑砂芯的稳定性。PCM工艺制造的铸型试样，型和芯是同时堆积而成，无需装配，位置精度更易保证。

7）无起模斜度　由于PCM工艺没有起模问题，所以传统铸型设计必不可少的起模斜度等约束在此失去意义。无起模斜度又进一步节省金属、减少加工量，节约工时，降低成本。

8）易于制造含自由曲面（曲线）的铸型　传统工艺中，采用普通加工方法制造含有自由曲面模样的精度难以保证，再加上铸造过程的误差，故自由曲面的铸件精度不高。而PCM工艺不存在成形的几何约束，采用RP离散－堆积成形原理能够很容易地实现任意复杂形状的造型。对自由曲面铸件可最大限度提高其表面精度，如泵的叶轮曲面，采用PCM工艺铸造出来后，无需加工即可装机使用。

2.1.2　PCM工艺的信息处理

和其他RP工艺相同，PCM工艺也是基于离散－堆积的成形原理。因此，在数据处理过程中既遵循RP数据处理的一般共性和流程，又存在自身的特殊性。

由于PCM工艺是计算机控制下的自动成形过程，其软件系统十分重要。软件系统包括：CAD造型软件、数据处理软件和控制系统软件。图6.16-2描述了PCM工艺的数据处理流程和各软件之间的关系。主要内容包括：PCM工艺铸型设计、铸型CAD分层和填充、扫描路径生成及优化、数控代码生成等四部分。其中，铸型设计在于确定PCM铸型的空间尺寸、形状和边界约束，分层和填充生成铸型的层面几何信息，扫描路径的形状和起始位置分别决定扫描喷射系统的运动轨迹和开闭状态，而数控代码则为造型过程提供全面完整的驱动控制信息。

（1）PCM工艺铸型设计

PCM工艺铸型设计是由零件CAD模型生成铸型CAD模型的过程，这一过程的实现不仅要依据铸造工艺知识、经验和一般性原则，也必须符合PCM工艺制造铸型的要求和特点。PCM铸型的设计过程和一般铸造工艺中铸型的设计过程基本一致，图6.16-3为PCM铸型设计软件流程图。首先，将零件CAD模型作为铸型设计过程的输入，根据铸造工艺条

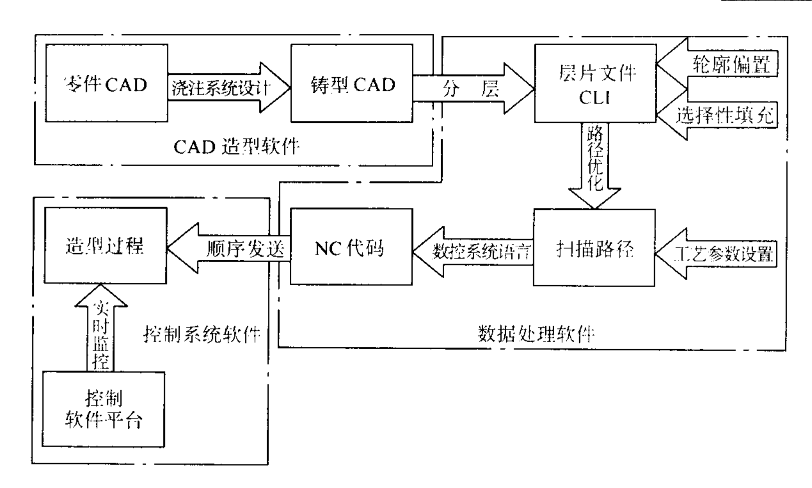


图 6.16-2　PCM 工艺数据信息处理流程

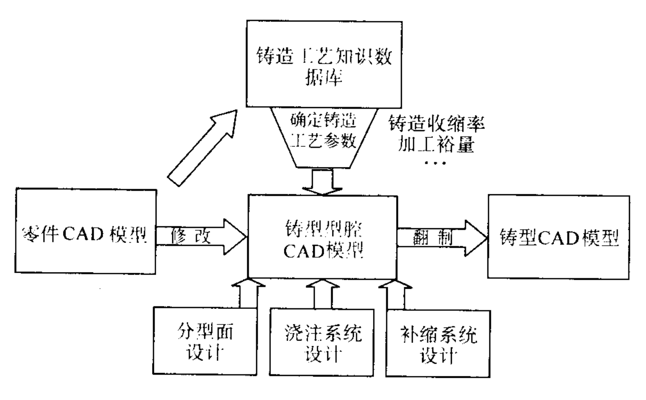


图 6.16-3　PCM 铸型设计软件流程图

件和要求，利用专家系统，根据工艺设计原则从数据库中提取适当的铸造工艺参数。这些工艺参数主要包括收缩率、加工裕量、起模斜度和铸造过渡圆角等。由于 PCM 工艺的最大特点是无需木模，起模斜度在此已失去意义，因此一般不予考虑。根据 PCM 工艺造型过程和浇注过程的要求，选取适当参数，对零件的 CAD 模型进行修改，即可得到铸型型腔的 CAD 模型。对它进行处理，就得到铸型主体的 CAD 模型。它是以零件模型作为空腔、具有一定壁厚的壳体，也是限制液态金属流动的物理约束边界。型腔的设计精度将直接影响金属凝固后铸件的尺寸精度。

得到铸型主体的 CAD 模型之后，可以根据一定的原则选择合适的分型面。然后对浇注系统和补缩系统进行设计，最终获得铸型 CAD 模型。

(2) 分型面设计和加工方向优化

由于 PCM 工艺制造铸型不存在起模问题，所以分型面设计与传统铸型的分型面设计既有共性又有区别。加工方向的选择一般与分型面垂直，同时又必须考虑多种因素，如成形后铸型的精度和表面质量等。

采用 PCM 工艺制造铸型，根据型腔来划分，可分为一体化造型和分型造型两种。对于形状简单、体积较小的铸型可采用一体化造型，即砂型、砂芯、浇注系统等统一建立 CAD 模型，成形时一次堆积成一个整体，加工完毕后从造型设备上整体取出铸型，再经后处理用于浇注金属。但是对于另外一些情况就必须进行分体造型，将铸型分为两个或多个型腔，部分造型，然后再拼和成一个完整的铸型。例如，型腔形状复杂的大型铸件，造型完毕后干砂不易清除，而且涂料也不容易涂敷均匀，这时应将铸型在截面积最大的位置分开，分别对上、下型造型，后处理完毕后再合型浇注。另外，对于一些上、下底面精度要求都较高的零件，根据 PCM 工艺特点也应分为上、下型造型。

结合铸造工艺与 PCM 工艺的特点，分型面的选择应该遵循以下几个原则。

1) 尽量使全部或大部分铸件、或加工基准面与重要加工面处于同一铸型内，以防止错型，减小铸件尺寸偏差。

2) 尽量使分型面数目最少。有些简单零件采用 PCM 工艺一体化造型，无分型面。

3) 分型面选择要有利于合型、下芯。

4) 为方便清砂、涂敷涂料等后处理工艺，分型面尽量选择在与加工方向垂直的铸件截面最大处。

上面仅列举了选择分型面的最基本原则，结合具体零件运用时，有时会发生矛盾，甚至需要与浇注系统的布置相结合进行综合考虑，所以必须根据铸件特点，分清主次矛盾，选择合理方案。

至于成形方向，除了考虑 RP 成形方向一般原则外，还应考虑 PCM 工艺的特点。PCM 成形方向一般与分型面垂直。分型面设计与铸型的成形方向有密切关系，一般是在确定了铸型成形方向之后再选择分型面位置。这里结合 PCM 工艺特点研究铸型加工方向的选择与优化问题。

确定最优加工方向必须考虑精度、加工时间、零件支撑等问题。对于 PCM 工艺来说，由于铸型自身是以周围型砂材料为依托完成成形的，支撑问题不必考虑，但必须考虑零件加工时的截面面积，面积较大时，层面加工时间长；面积较小时，层面加工时间相对较短。加工精度是确定加工方向时所需考虑的首要因素，PCM 工艺以加工精度和加工时间为主要目标进行加工方向的选择与优化。

为实现上述目标，必须综合考虑下述几方面因素：

1) 使垂直面的面积最大；
2) 使法向量向上的水平面面积最大；
3) 使成形基面的面积最大；
4) 使斜面的数量最少。

总的来说，为确保台阶区面积最小，从而达到最好的表面质量状况，就必须尽量使零件中对加工有利的因素增加（如垂直面或水平面），不利的因素减少（如斜面的数量或面积），以期实现加工精度最高的目标。同时，为了减少加工时间，还需要考虑下面这一最关键的因素——总的分层数量最小。下面分别介绍以加工精度和加工时间为目标的加工方向优化选择。

1) 以加工精度为目标优化加工方向　以提高加工精度为目标，应该选择在某一方向下误差最小为最优加工方向。优化函数（目标函数）Q 表示为：

$$Q=\min(Q_i)\quad(i=1,2,\cdots,m)\qquad(6.16\text{-}1)$$

式中，Q_i 为第 i 个加工方向的目标值，以此加工方向下的相对误差值来计算；假设有 m 个加工方向可选。

目标值的计算可以利用如下加工误差公式（误差模型如图6.16-4所示）：

$$\delta V = k\sum_{j=1}^{n} A_j d\,|\cos\beta_j| \tag{6.16-2}$$

图6.16-4　误差计算模型

式中，A_j 为第 j 个面片的面积；β_j 为第 j 个面片法向与加工方向的夹角（小于90°时，即为面片与分层平面的夹角）；n 为面片数量；k 为一个小于1的常量系数，随误差模型不同而异；d 为分层厚度，在PCM工艺中，d 为常数。

那么 Q 就可以简化为：

$$Q_i = kd\sum_{j=1}^{n} A_j\,|W_{ij}| = K\sum_{j=1}^{n} A_j\,|W_{ij}|$$
$$(j = 1,2,\cdots,n;\ i = 1,2,\cdots,m) \tag{6.16-3}$$

式中，W_{ij} 为在第 i 种加工方向下，分配给第 j 个面片的误差权重向量，也就是该面片的单位法矢量在加工方向 i 上的投影；K 为常量系数。

权重系数体现了曲面类型对成形精度的影响程度。对PCM工艺来说，垂直面与水平面可获得最高的成形精度，而斜平面和曲面则相对较差，其对加工精度的影响将视曲面法向与加工方向的夹角 β_{ij} 的大小不同而不同。

$$W_{ij} = \begin{cases} \cos\beta_{ij};\ 0 < \beta_{ij} < \pi \\ 0;\ \beta_{ij} = 0,\ \pi \end{cases} \tag{6.16-4}$$

由此可见，曲面与分层平面的夹角是影响“台阶区”投影面积的主要因素。完全水平和垂直的平面在零件中是不多见的，大部分的面可能是斜面、柱曲面或自由曲面等。

权重系数的精度可由面片的数量进行控制。面片数量越多，则权重系数的确定越准确，目标值的计算也越精确。计算多个可选加工方向下的 Q 值并用一维优化方法分析，Q 值最小的方向就是精度最高的加工方向。

2）以加工时间为目标优化加工方向　加工时间是PCM工艺的一个重要指标，它反映了工艺过程的效率和成本。一般情况下以成形精度为首要目标，加工时间只是确定最优加工方向时的次要目标。当利用成形精度目标函数求出多个较优解时，才使用加工时间作为第二判据继续进行优化。

PCM铸型每一层的加工时间 T_0 由两部分组成：层面加工时间 T_m 和层间等待时间 T_w。其影响因素主要包括：加工区域的面积、扫描速度、扫描间距、分层厚度和层间等待时间等。扫描速度和扫描间距一般是根据成形精度和光洁度要求并结合工艺性能确定的，与加工方向的选择关系不大。加工区域的面积与加工时间存在正比关系，但是铸型加工区域的面积是由铸件体积决定的，铸件体积越大，铸型的壳壁越厚，加工区域面积就越大；反之加工区域面积越小。加工区域的面积可以近似等于铸件体积除以分层厚度。分层厚度一般也是根据成形形状精度和表面精度决定的，分层厚度增大，加工时间缩短，但导致精度降低。综上所述，无论铸型如何放置，只要体积和层厚一定，加工区域的面积就是一定的，则累计层面加工时间 T_M 也是一定的。所以在以加工时间为目标函数优化加工方向时，将加工区域的面积、扫描速度、扫描间距、分层厚度等因素忽略，主要考虑累计层间等待时间 T_W。

在PCM工艺中，层间等待时间 T_w 是指相邻两层进行扫描喷射之间的时间间隔。每层扫描喷射结束后，需要将 Z 轴上升一个层厚 d 并铺一层型砂。上升时间和铺砂时间一般为常量，因此层间等待时间 T_w 也是常量。累计层间等待时间 T_W 与加工方向有直接的关系，加工方向上层数越多，即沿此方向铸型的高度越大，则累计层间等待时间 T_W 越长；反之越短。如果只考虑累计层间等待时间，则加工时间的目标函数值 T_i 可用沿第 i 个加工方向的铸型高度 h_i 来计算：

$$T_i = T_M + T_W = T_M + kT_w = T_M(h_i/d)T_w = T_M + (T_w/d)h_i \tag{6.16-5}$$

式中，k 为总层数。由上述讨论可知，T_M、T_w 和 d 都是常量，因此以加工时间最小化原则优化加工方向有：

$$T_{min} = C_0 + C_{1min}(T_i)\ (i = 1,2,\cdots,n) \tag{6.16-6}$$

式中，n 为备选的加工方向数量，C_0 和 C_1 都是常量。

3）PCM工艺铸型加工方向的确定　它是以加工精度为第一优化目标，加工时间为第二目标的多目标优化问题。该问题的求解算法如下：

① 找出所有可能作为铸型基准面的平面（这时需要考虑铸型的分型面要求等约束），然后列出以这些平面为加工基面时所有可能的加工方向；

② 对每一可能的加工方向，根据公式（6.16-3）计算加工精度目标函数值 Q_i；

③ 求出 $Q_{min} = \min[Q_i]$；

④ 如果只有一个最小值，则以最小值对应的加工方向为最优加工方向，输出计算结果并结束；否则，继续做第5步；

⑤ 选择加工精度目标值最大的加工方向为一类，根据式（6.16-6）计算这一类加工方向下的加工时间目标值 T_i，并求出最小值；

⑥ 根据加工精度目标值最大和加工时间目标值最小确定PCM铸型的最优加工方向。

（3）浇注系统的设计原则

浇注系统是引导金属液进入铸型型腔的一系列通道的总称。铸造生产实践和研究表明，在一定的浇注条件下，金属液的充型能力与它的平均流速 v 及它进入型腔直到停止流动为止的时间 τ 密切相关。工艺设计者必须在考虑金属流动性、铸型的性质、浇注条件和铸型结构等综合影响的基础上，设计出合理的浇注系统，从而获得合适的基本条件 v 和 τ。不理想的浇注系统会使铸件产生气孔、砂眼、缩孔、裂纹、未浇满、冷隔等缺陷。实际生产中，由于浇注系统设计不当而引起的废品率高达30%。所以，浇注系统设计优劣对铸件质量影响很大。浇注系统设计要在考虑金属液快速平稳地充满型腔的前提下，注意合理布局，经济方便。长期以来，人们利用生产经验总结的各种图表、经验公式或定常流动的伯努利方程来设计浇注系统。近半个多世纪以来，以相似理论为指导，水力模拟法和数值模拟流场等方法在浇注系统的研究和应用上进展很大，这些方法也迎合了计算机辅助设计的发展需要。

PCM工艺的铸造基础是传统树脂砂铸造工艺，所以其浇注系统的设计首先必须遵循树脂砂浇注系统的设计原则，同时考虑PCM工艺自身的特殊性，进行适当的修改和调整。在一般铸造中，浇注系统对铸件质量的影响是多方面的。良好的浇注系统的作用就是能控制金属液充填型腔和形成铸件的全过程。呋喃树脂砂发气量较大，金属液体与砂型的界面反应较复杂。在设计浇注系统时，更要考虑防止气孔、气渣孔、粘砂，同时兼顾其他方面。

铸铁件呋喃树脂自硬砂浇注系统的设计原则可以概括为：“快、稳、封闭、底注、保证压头、特殊冒口的设置”。



1）快　快速充型，浇注速度快。要求尽量控制在 1 min 内浇完，使型腔在尚未大量发气之前就被铁液充满。这不仅可以抑制侵入性气孔的产生，而且减轻了型腔的造渣反应，使型腔顶部受高温辐射的时间缩短。为了实现快速浇注，可通过扩大浇注系统截面积、增加直浇道数量（多包同时浇注），加大浇口杯容量等措施解决。

2）稳　避免铁液飞溅、碰撞与紊流，以防止气体卷入，保证铁液在型腔中流动通畅，无死角。有利于冷、脏铁液的导向。

3）封闭　优先采用全封闭式的浇注系统，即 $\Sigma F_{直} > \Sigma F_{横} > \Sigma F_{内}$（$F$ 为截面积）。采用全封闭浇注系统，不仅挡渣效果好，而且能有效防止气体卷入，使浇道各部分在浇注过程中始终处于充满状态。一般浇注系统各部分截面积比可以取 $\Sigma F_{直}:\Sigma F_{横}:\Sigma F_{内} = 1.5:1.25:1.0$。内浇道一般以扁平体形截面为佳。为防止内浇道处热量过于集中，内浇道应分散设置。同时，为了提高浇道的撇渣作用，一般以横浇道高度：内浇道高度$\geqslant$3 为宜。

4）底注　有一定高度的铸件，尤其是带有导轨等重要加工面的铸件，或结构复杂、要求较高的铸件，最好采用底注。底注可以保证液流平稳、型腔排气通畅、脏铁液容易上升。

5）保证压头　对于侵入性气孔的产生机理，一般认为只有当气体压力大于铁液对铸型的压力时才会发生。所以对于气体压力较大的树脂砂而言，需保持较高的铁液压头。为保证铁液压头，应有一定的上型高度或利用加高浇口杯、设置一定高度的冒口圈、出气孔来达到提高铁液压头的目的。

6）冒口的设置　树脂砂型刚度好，浇注初期砂型强度高，这就有条件利用铸铁凝固中的石墨化膨胀，有效地消除缩孔、缩松缺陷，实现灰铸铁件、球墨铸铁件的少无冒口铸造。但为了使浇注过程中型腔内的大量气体能顺利排出，必须多设出气冒口，原则上要求 $\Sigma F_{冒} \geqslant \Sigma F_{内}$。另外，为了导引出脏铁液，改善铸件顶面质量，有时也在顶面设置溢流冒口。

补缩系统的主要作用是在铸件成形过程中提供由于体积变化而需要补偿的金属液，以防止在铸件中出现收缩类型的缺陷。一般要从铸件的结构和合金的特性出发，考虑是否有必要设置补缩系统。采用同时凝固工艺就可以不采用补缩系统，采用方向性顺序凝固，就要设计冒口等补偿结构。另外，补缩系统还可以提高铸件内部质量，增大金属在型腔内凝固时的温度梯度，加速凝固过程，有利于获得致密的组织结构和可靠的力学性能。

（4）CLI 文件的预偏置

在 PCM 工艺中，CLI 文件进行轮廓偏置和填充前，需要进行轮廓的预偏置。对 PCM 工艺来说，其单元堆积过程不再是用真正意义上的“刀具”，而是喷头，在此仍不妨称之为“刀具”。这样，对于 PCM 工艺来说，“刀具半径”就对应着黏结剂与型砂的固化线宽。在实际成形过程中，固化宽度是有一定大小的，而分层产生的截面轮廓线则是 RP 成形的理论轨迹线。因此，如同数控加工技术一样，PCM 工艺也需要进行半径补偿，以提高成形精度。当固化线宽较大时显得尤为重要，否则将直接影响分层截面的轮廓成形精度。

事实上，如同 PCM 工艺一样，其他所有 RP 工艺都存在着“刀具补偿”的问题。唯一不同的，只是“刀具”和“刀具半径”的含义有所区别而已。

因此，在实际的 PCM 工艺过程中，喷头的运动轨迹不能是铸型截面的实际轮廓线，而应根据轮廓线边界的内外性，使“刀具”（即喷头）中心向铸型轮廓边界的内侧偏移一个刀具半径的距离，即补偿偏移量为固化宽度的一半（如图 6.16-5 所示，实线是从铸型 CAD 模型分层获得的理论轮廓，虚线是补偿后喷头的运动轨迹）。这就是 PCM 工艺中 CLI 文件预偏置的含义。

如图 6.16-5 所示，CLI 文件预偏置的方向是铸型理论轮廓的内侧，偏置次数为一次，偏置距离为固化线宽的一半。预偏置的结果就是若干个原始偏置环，它们是轮廓偏置和填充数据处理过程的基础。

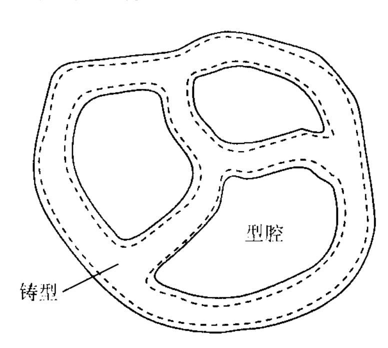


图 6.16-5　轮廓预偏置

在 PCM 工艺中，预偏置只需进行一次偏置。因此，它只是轮廓偏置的一种特殊情况。

（5）填充

PCM 工艺制造的铸型是具有一定壁厚的壳体。因此在成形过程中，除了要进行轮廓扫描外，还要对轮廓内部进行一定形式的填充。对于多数 RP 工艺而言，都需要对轮廓内部进行填充。轮廓线的偏置扫描是为了使铸型表面获得一定壁厚，填充的目的则是使型壳具有一定强度以满足铸造要求。

首先，铸型表面必须具有一定的壁厚和表面质量。因此，在对铸型 CLI 文件进行预偏置之后，需要在原始偏置环的基础上继续进行若干次偏置，方可得到一定壁厚（如图 6.16-6）。为保证偏置环之间的粘接强度，型砂固化线的径向截面必须有一定重合，因此每次的偏置距离不能超过一个固化线宽（如图 6.16-7）；偏置次数则由铸型在后处理和浇注过程中所要求的型壁强度和刚度决定。在保证强度及刚度的前提下，偏置次数应尽量减少，以降低铸型中的黏结剂含量，减少浇注过程中的发气量。另外，还可通过有限元分析和造型实验寻求最佳偏置距离及偏置次数。

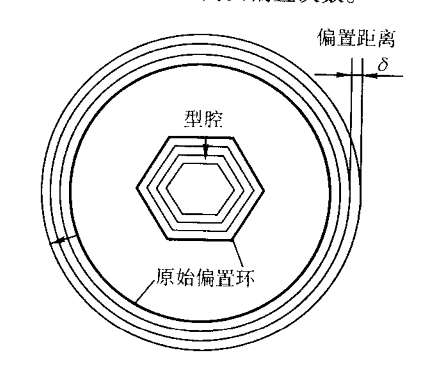


图 6.16-6　轮廓偏置图

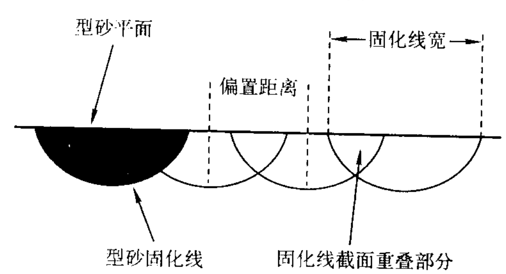


图 6.16-7　偏置距离



其次，为了保证砂型型壳在后处理和搬运过程中不至于损坏和破裂，并能在浇注过程中抵御高温金属液的冲击和金属凝固过程中的膨胀变形，型壳必须具有一定的壁厚以保证足够的强度。因此，在经过原始偏置环的多次偏置后，需要对铸型型壁的轮廓内部、轮廓偏置线之间的区域进行一定形式的填充，以保证型壁表面之间的粘接强度和完整性（如图6.16-8所示）。

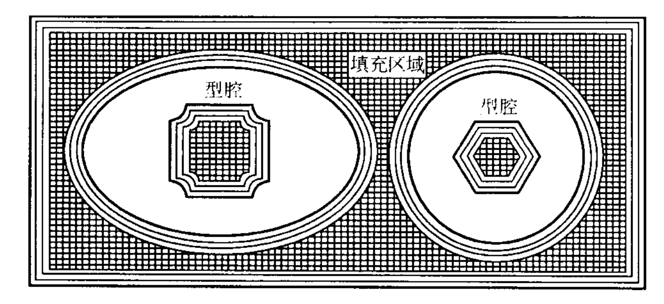


图6.16-8　填充区域示意图

大量对比分析和试验证明，十字网格填充方式比较适合PCM工艺，能够较好地满足工艺特点对填充方式的要求。这种填充方式具有以下突出优点。

1）扫描速度快，填充效率高　填充时扫描系统只沿 x、y 方向作单轴运动，不需要两轴联动，控制器不作插补运算，只需向一根轴的电机发送控制信号，CPU计算速度快。而且，单轴运动时不存在多轴运动的机械耦合，也能使扫描速度提高。因此，网格填充方式能缩短造型时间，提高造型效率。

2）编程简单　这种扫描填充线是 x、y 轴的平行线与铸型轮廓偏置线的交线，所以填充线的生成算法较为简单。采用 x、y 方向的填充栅线（ray）与铸型轮廓偏置线求交，第奇数个交点就是填充线的起点，紧随其后的另一个交点是该条填充线的终点。一条填充栅线与轮廓偏置线可能交成多条扫描线，在偏置线边界以外不存在填充线。可见这种填充轨迹的生成算法比较简单，与铸型轮廓几何形状的复杂程度关系不大。

3）强度高，填充组织的形态和物理性能较为均匀　在各种填充方式中，除十字网格填充之外，其他填充方式都具有一个明显的共同点：局部区域内只有互相平行的单向填充线。因此，它们都不可避免地存在着以下缺点：扫描方向单一，导致成形件内部微观组织形态和强度具有各向异性，成形件的物理性能欠佳。而网格填充方式则在很大程度上克服了这些缺点：由于填充线互相正交，不仅填充组织的形态和物理性能较为均匀，而且局部强度大大增加，能够较好的满足PCM工艺对铸型的强度要求。

4）不影响PCM铸型表面的成形精度和光滑度　其他RP工艺中，在零件轮廓线与填充线的交点处会由于机械系统的启停误差而降低成形精度；另外，在填充线的启停处要求成形工具（如激光器、喷头等）具有高速响应的能力，如果响应速度达不到要求，就会在填充线的启停点造成材料固化过多的“结瘤”现象，使最终成形件表面粗糙度不能满足要求。而PCM工艺则不存在上述问题：铸型轮廓由多个偏置环组成，具有一定壁厚，填充区域只是这些轮廓偏置环之间的区域（如图6.16-18所示），填充线不接触铸型外轮廓，因此铸型表面的成形精度和光滑度完全不受填充方式的影响。

5）铸型发气量小，透气性好　采用网格填充方式，网格间距可根据实际情况进行调节。增大网格间距，能够显著降低树脂含量，减小铸型发气量；而且，网格结构使铸型密度减小，质地疏松，透气性增大，有利于浇注过程中气体的扩散溢出。

（6）喷射路径的生成

1）轮廓偏置　PCM工艺采用轮廓偏置扫描方式来成形铸型表面轮廓。这是因为型砂凝聚单元体的尺寸较大，使扫描线间距也较大，如果不进行轮廓偏置（预偏置）而直接进行网格填充，则每一层成形表面的轮廓明显不光滑，使最终铸型的表面质量无法满足要求。另外，在造型实验中，喷头的控制响应能力不太高，成形中“结瘤”现象较为突出，严重影响铸型的精度和表面质量。所以PCM工艺没有采用网格直接填充的方式，而是探索了一种新的方法，这就是轮廓偏置、网格填充的方法。轮廓偏置的目的不仅在于提高铸型表面质量，而且能够使铸型内外壁都获得一定厚度和强度，以便进行后续的截面填充。

轮廓偏置法最明显的优点是：铸型表面的轮廓线是一条完整的封闭线，这就使得铸型内壁比较光滑，而且减少了喷头的开闭控制次数和扫描过程中的“结瘤”现象，提高了铸型表面的成形精度。更为优越的是，这种成形方式节省材料，使铸型壁厚均匀一致。

如前所述，轮廓偏置的实质就是传统切削加工中的“刀具补偿”。在PCM工艺中，刀具半径等于一定扫描速度和一定流量下单位固化线宽的一半。传统的数控加工中，已经有很多较为成熟的偏置算法，但都不能完全解决偏置过程中奇异图形的产生，如自交、相交等。

2）扫描路径的生成　PCM工艺要求数控系统能将许多首尾相连而且方向变化不大的折线合并成连续路径进行扫描，而不是一条条地扫描。该方法称作路径扫描法。路径扫描是一种特殊的插补运行方式，在一条路径扫描过程中，只在路径起点和终点分别加减速一次，在中间各点分速度发生变化，合成速度不变。在黏结剂流量一定时，只有扫描合成速度为常量才能保证成形精度和表面质量。因而，在每层扫描时，只要数据处理软件能正确地将折线按一定规则合并成路径，便可以大大提高扫描效率，而且不存在二次近似问题。例如，对一般铸型，构成每层轮廓的几百条甚至上千条折线通常可合并为几条路径。路径的产生原则是：按照运动轨迹的具体形状生成尽可能长的连续扫描路径。

为保证层面轮廓的加工质量，PCM工艺采用轮廓偏置、网格填充的方式来进行造型。层面轮廓由若干条偏置环组成，偏置环之间的区域则用十字网格进行填充。

若干条原始偏置环经过多次偏置而产生的轮廓偏置环还不能直接作为黏结剂的扫描路径，因为每个环之间是独立的，必须将这些独立的环线连接起来，使喷头能够连续运动。多环连接的最基本的原则是：上一环的终点与下一环的起点间的距离尽可能小，以减小喷头运动过程中的空程。如果两环是平行关系（上述距离等于 d），即一个环是由上一环偏置产生，则喷头在两环过渡处不用关闭；如果两环无关，则喷头在两环过渡处必须关闭。

3）扫描路径的优化　喷头是随扫描系统运动的，所以扫描系统的运动精度将直接决定黏结剂在X－Y平面上喷射的准确性。在PCM设备中，工作平台机械结构刚度大，加工精度高，所以扫描运动中由机械部分造成的误差可忽略不计。但由于PCM工艺扫描速度快，而且扫描方式为轮廓线连续扫描，在轮廓线拐点处由于加速度过大使机械系统中滚珠丝杠副不能及时响应而造成振动和冲击，将严重影响喷射精度。

生成扫描路径的过程中，把CLI文件偏置后形成的偏置环以点的形式顺序连接在一起，构成若干条原始路径。这种原始路径在工艺的具体实现过程中会带来很多困难：一方面，各偏置环内部、环与环之间的过渡可能存在尖锐的拐角。在高速扫描过程中，由于机构本身存在惯性，速度方向发生剧烈变化而使加速度过大，导致机构出现振动和冲击，



为造型过程带来不利影响。另一方面，在原始路径中，喷头只在每个环的起点处起喷、终点处停喷，而喷头本身由电磁阀控制开闭，存在一定迟滞；这样，由于喷头开闭点位于路径中的"理论开闭点"，所以，不可避免地会出现一些由这种开闭延迟所带来的缺陷，例如结瘤、过喷以及其他一些在不正确位置的开闭。这些缺陷，会严重影响层面的加工精度和铸型的最终质量。

路径优化的方案之一，就是在相邻偏置环之间增加圆弧过渡，以减小速度方向的变化。目的有两个：首先是防止瘤的产生，其次是克服喷头开闭响应迟滞。

具体算法步骤如下：

① 所有的环顺序编号；

② 确定第二个环的起点，将该点作为第一个环的扫描起始点；

③ 计算出第一个环的起始圆弧半径；

④ 确定第一个环的终点，将该点作为第二个环的扫描起始点；

⑤ 计算第二个环的起始圆弧半径，即第一个环与第二个环之间的过渡圆弧半径；

⑥ 依次类推，确定第 $n-1$ 个环的终点，将该点作为第 n 个环的扫描起始点；

⑦ 计算第 n 个环的起始圆弧半径，即第 $n-1$ 个环与第 n 个环之间的过渡圆弧半径；

⑧ 所有的环和相应的起始圆弧顺序连接，形成一条完整的扫描路径。

如图 6.16-9，首先确定 L_2 的起点 P_1，作为 L_1 的起始点，然后计算出 L_1 的起始圆弧半径 $P_1P_2/2$，接下来确定 L_1 的终点 P_2，将 P_2 作为 L_2 的起始点，计算出 L_2 的起始圆弧半径 $P_2P_1/2$，以此类推，最终将所有环和相应的起始圆弧顺序连接，形成一条沿箭头方向的完整的扫描路径 $P_1P_2P_3P_2P_1P_4P_1P_5P_6P_5$。

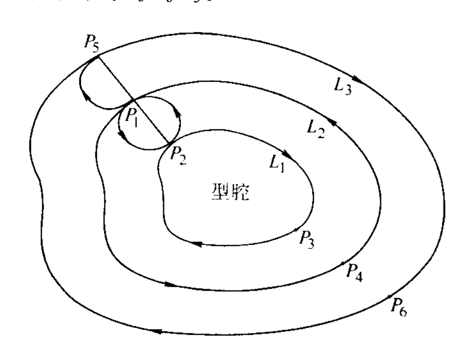


图 6.16-9 环间圆弧过渡示意图

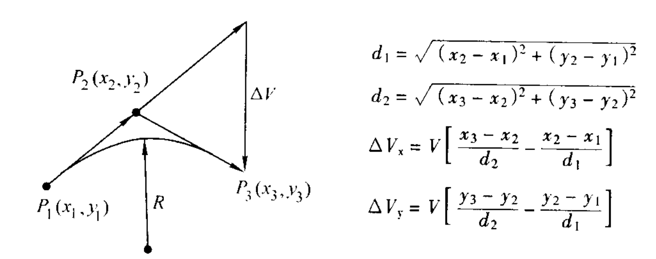
在上述过程中，需要注意两点：首先，必须保证第一个环的起始点处于扫描区域之内，否则，扫描轨迹将进入层面轮廓的型腔区域，破坏铸型型腔的内表面。在上述算法中，第一个环的起点就是第二个环的终点，因而它自然处于扫描区域之内；其次，增加圆弧过渡之前，必须对每个环的点进行排序，使相邻两个环的方向相反。

另外，环间过渡还可采用其他类型的曲线，如二次曲线、B样条曲线、非有理B样条曲线、贝塞尔曲线和三次样条曲线等。

扫描机构的惯性、数控系统的驱动能力与动态特性，对运动速度及加减速度都有一定限制。PCM工艺中，扫描系统在一个指定的路径（path）内以不变的速率连续扫描，避免了频繁的启停，提高加工效率的同时也提高了扫描质量。但是，在路径中的某些拐点处由于速度方向变化过大可能产生很高的加速度，超过数控系统的驱动能力，造成振动和冲击。而且，后续工艺实验中发现，固化后的砂型在扫描线的拐点附近失真，明显的特点是这个区域的砂型向内收缩了。分析发现，该区域的黏结剂过多。这是因为，扫描速度不可能完全均匀，拐点处扫描速度降低，而黏结剂的流量不变，因此导致了黏结剂的"过喷"现象。如果拐点处采用圆弧过渡，就可以使扫描速度较为均匀，从而避免这个问题。

另外，铸造工艺也要求铸件棱角处具有一定大小的结构圆角。虽然"棱角分明"是表征铸件外形质量的形容词，但棱角结构由于交角处的内接圆较大（金属堆积较多），容易造成应力集中，因而可能产生缩孔、缩松、甚至裂纹等缺陷。为防止这类缺陷以及柱状晶直交缺陷，在设计中铸件的转角和连接处往往采用结构圆角。在计算中，过渡圆角半径R的取值可根据铸造工艺的结构圆角大小而定。

基于上述原因，在扫描路径的优化中，拐点处增加了过渡圆弧。根据两条扫描线段连接点处的速度变化来判断是否需要增加过渡圆弧（如图6.16-10所示的 ΔV_x 和 ΔV_y）。如果该点处的速度变化（或角度变化）大于设定值，则用一条圆弧来过渡。过渡圆弧的半径R可以根据铸造工艺的要求由用户设定。



$$d_1=\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}$$

$$d_2=\sqrt{(x_3-x_2)^2+(y_3-y_2)^2}$$

$$\Delta V_x=V\left[\frac{x_3-x_2}{d_2}-\frac{x_2-x_1}{d_1}\right]$$

$$\Delta V_y=V\left[\frac{y_3-y_2}{d_2}-\frac{y_2-y_1}{d_1}\right]$$

图 6.16-10 拐点处的圆弧过渡判据

具体算法步骤如下：

① 将所有的环顺序编号。

② 在存储每个环节点的链表中，以循环的形式遍历所有的点。

③ 前一个点记为 P_1，当前点记为 P_2，下一个点记为 P_3。

④ 计算的 P_1P_2（d_1）、P_2P_3（d_2）、ΔV_x 和 ΔV_y 的值（如图 6.16-10 所示的计算公式）；

⑤ 设定两个参数 ΔV_{xmax} 和 ΔV_{ymax}，线段拐点处速度变化如满足如下条件：

$$|\Delta V_x|>\Delta V_{xmax} \quad 或 \quad |\Delta V_y|>\Delta V_{ymax}$$

则用半径为设定值 R 的圆弧来过渡这两条线段的拐点处；否则不作处理。

⑥ 指针后移，继续循环直到当前链表结束。

⑦ 以此类推，遍历所有的环链表。

实验发现，进行上述处理后，在扫描速度恒定的情况下，X－Y扫描机构运动平滑、精确，保证了层面中砂型固化的准确性；另一方面又符合铸造工艺的特点。

喷头的理想状态只有"开"和"闭"两种状态，但在两种状态切换之间，由于机械和电磁共同作用需要响应时间，所以喷头在喷射和关断时会产生延迟，导致起喷时的"滞后"和停喷时的"流涎"现象。

为解决这一问题，确定喷头正确的开闭位置，本文提出了喷射延迟距离、关闭延迟距离和首尾重合距离的概念，在数据处理软件中作了相应的优化处理。如图 6.16-11 所示，P_0 为喷头的理论开启点，即扫描路径的起点；P_1、P_2、P_3 分别为喷头的理论关闭点、实际开启点和实际关闭点。喷射延迟距离 P_0P_2 是喷头的理论开启点（扫描路径起点）P_0 与实际开启点 P_2 之间的距离；关闭延迟距离 P_1P_3 是喷头



的理论关闭点 P_1 与实际关闭点 P_3 之间的距离；首尾重合距离 P_2P_3 是喷头实际开启点和实际关闭点之间的距离，是喷射路径实际的首尾重合距离。一般根据经验和喷头的响应能力对它进行设置，以保证轮廓的完整性和加工质量。它等于 P_0P_1、P_1P_3 之和减去 P_0P_2。其中，P_0P_1 是喷头的理论开启点和理论关闭点之间的距离，是喷射路径在理论上的首尾重合距离，需要经过计算得到。

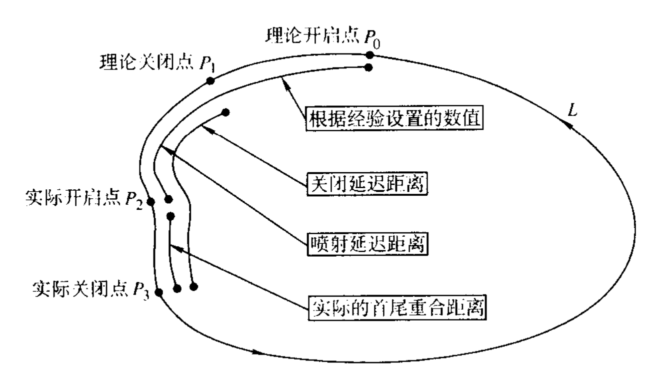


图 6.16-11 喷射路径的首尾重合

该算法的实现是基于喷头起喷和停喷时滞后时间的实际测量值 t_1、t_2。由于 t_1、t_2 基本上是常量，因此 P_0P_2 和 P_1P_3 决定于实际的扫描速度 v。根据上述讨论可知：

喷射延迟距离：$P_0P_2 = t_1 \times v$。

关闭延迟距离：$P_1P_3 = t_2 \times v$。

实际的首尾重合距离：$P_2P_3 = P_0P_1 + P_1P_3 - P_0P_2 = (t_2 - t_1) \times v + P_0P_1$。

设 $P_2P_3 = \delta$，则 $P_0P_1 = (t_1 - t_2) \times v + \delta$；令 $P_2P_3 = \delta = 0$ 时，则 $P_0P_1 = (t_1 - t_2) \times v$。

一般情况下，喷头的喷射和关断存在延迟，流量不稳定。为保证 P_1P_3 段扫描轨迹的连续性和均匀性，P_2P_3 通常设定为大于零的某个数值 λ。此时，$P_0P_1 = (t_1 - t_2) \times v + \lambda$。

在造型之前，通过试验测定 t_1、t_2，设置路径的扫描速度 v，然后根据要求确定实际的首尾重合距离 λ，最后可根据上式计算出 P_0P_1，从而确定喷头的理论关闭点，在路径中进行正确设置。

假设 $P_0P_1 = \Omega$。具体算法步骤如下：

① 将所有的环顺序编号；

② 将环的起点 P_0 设定为喷头的理论开启点（在该点令喷头打开）；

③ 设定距离累加变量 Σ，置初值 $\Sigma = 0$；

④ 在存储每个环节点的链表中，以循环的形式遍历所有的点；

⑤ 当前点记为 P_1，下一个点记为 P_2；

⑥ 计算 P_1P_2 的距离值 d，令 $\Sigma = \Sigma + d$；

⑦ 如果满足 $\Sigma > \Omega$，则将当前点 P_1 设定为喷头的理论关闭点（在该点令喷头关闭），结束当前链表的循环；否则，指针后移，转⑤；

⑧ 以此类推，遍历所有的环链表。

至此，就可以确定喷头在所有环中的理论关闭点，使每个环中喷头起喷处与停喷处的衔接更为均匀平滑。

在每层轮廓中一般都有若干个原始环，它们以一定的顺序存储在一个链表指针里。偏置时，依次取出所有环进行偏置。偏置完成后，每个环的偏置环还是按照原始环的存储顺序存储在一个链表中，每次的偏置结果都附在链表的结尾（见图 6.16-12）。生成数控代码时，从该链表中读取数据直接编写。这种存储方式对提高造型效率很不利：扫描喷射时，喷头必须在所有的偏置环之间往返运动。为保证轮廓的完整性，在偏置环之间喷头是关闭的。这就相当于数控加工中的空程。偏置的次数越多，空程也越多，不仅极大的浪费了加工时间，而且降低了造型效率。因此，需要对路径中的所有偏置环重新排序，以减少空程，提高造型效率。

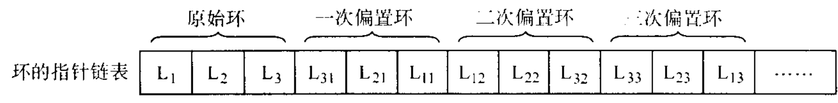


图 6.16-12 环链表的存储结构

排序时，把每个环的所有偏置环作为一组环放在一起（见图 6.16-13）。在每一组环里，相邻环之间的距离只是一个偏置半径（小于固化线宽）的长度。造型时，喷头只需偏移很小的距离即可继续喷射扫描，大大提高了造型效率。

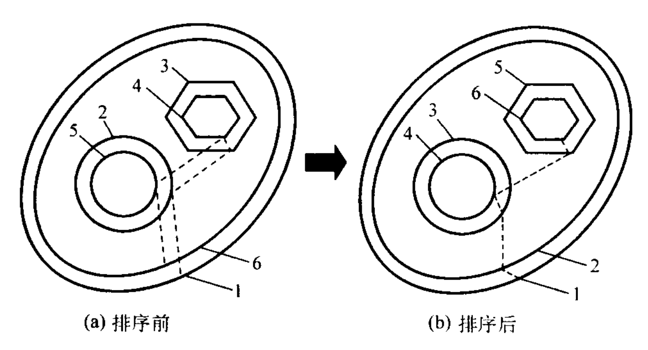


图 6.16-13 环的重新排序

（实线表示实际轮廓，虚线表示空程）

注：图中的标号表示扫描的顺序

2.1.3 PCM 工艺材料

造型材料的性能须满足 PCM 工艺的特殊要求。如每一层固化时要求黏结剂与型砂快速反应并具有一定强度，使后续黏结过程对已固化部分不造成破坏；由于采用分层造型原理，要求已固化部分具有足够的支撑强度；对原砂材料要求流动性好，易于铺平、紧实和清除。为使造型过程便于控制和实现，要求采用无需加热的冷硬树脂砂工艺。

铸造用的合成树脂砂工艺种类很多。按化学成分来划分，主要分为呋喃树脂砂、酚醛树脂砂和脲烷树脂砂；按硬化机理又可分为热硬化树脂砂、自硬化树脂砂和冷硬化树脂砂三种。热硬化树脂砂需加热到 150～300℃；自硬化树脂砂在常温下需保持一段时间。由于 PCM 工艺要求黏结剂快速固化，因此这两种硬化方式均不能满足工艺要求。而冷硬化树脂砂在常温下很短的时间内即可发生硬化反应，因而成为 PCM 工艺的理想选择。

（1）原砂

原砂的性能和质量对铸件的表面质量乃至内部质量都有重要的影响。铸造工艺对原砂的要求主要是耐火性、热化学稳定性、工艺性能及其经济性。铸造用原砂一般是以石英为主要矿物成分的天然硅砂。传统树脂砂工艺对原砂的要求主要包括如下几方面：粒度、粒度分布、粒形、含泥量、含水量、酸耗值、微粉含量、pH 值、SiO_2 含量等。PCM 工艺对



原砂的要求基本上继承了传统树脂砂的要求，同时存在一些特殊要求。

对于原砂的粒度，主要从三个方面考虑。

1）从铸件表面质量来考虑　用较细的型砂时，铸型表面较为平整，而且由于细粒砂之间的空隙小，有利于防止渗入性粘砂。此外，细粒砂所形成的铸型表面，抵抗金属液冲刷的能力较好，铸件不易产生冲砂缺陷。因而，细粒砂有助于提高铸件的表面质量

2）从型砂的透气性考虑　型砂的透气性决定于两个因素：一是砂粒之间空隙的总体积，二是空隙尺寸的大小。孔隙率相同的型砂，砂粒越细，透气性越差。

3）从型砂的粘接强度考虑　粒度对粘接强度也有两方面影响：一方面，原砂越粗，其比表面积越小，树脂加入量一定时，砂粒表面包覆的树脂膜就越厚，砂粒之间粘接桥的截面积也越大，这将使粘接强度增大；另一方面，砂粒越粗，则一定重量的原砂中颗粒数越少，砂粒之间的接触点数量也会减少，这一因素又会使砂型强度下降。一般来说，对于颗粒尺寸小于0.2 mm（即75目以上）的原砂，比表面积的影响大于粘接桥数量的影响，即较粗的原砂将使树脂砂的强度提高。

PCM工艺主要针对大中型铸型的制造，所以原砂的颗粒尺寸不能过小，否则原砂流动性差，铸型透气性差，但又不能太粗，否则透气性太高，铸型表面粗糙，达不到精度要求。综合考虑上述三方面因素，PCM工艺的原砂粒度指数选为100/120目（0.15 mm）。

原砂的粒度分布对造型性能影响也较大，尤其对型砂的透气性影响比较显著。多种粒度等级的组合使孔隙率减小，透气性降低。而且，当粒度分布范围较宽时，型砂凝聚体单元的各向异性显著增大，增加了铸型的表面粗糙度。因此，PCM工艺对选用的原砂粒度分布有严格要求，相对比较集中。国内外的研究经验证明，树脂砂的粒度分布要求遵循四筛分布原则，即原砂粒度分布基本上集中于尺寸相邻的四个筛中。PCM工艺的原砂粒度分布也需遵循同样的原则。

另外，原砂的粒形也是影响铸型性能的因素之一。根据GB/T 9442—1988规定，原砂的颗粒形状可分为三种：圆形砂，颗粒为圆形或接近圆形；多角形砂，颗粒为多角形，且多为钝角；尖角形砂：颗粒呈尖角形，且多为锐角。

某一种形状的原砂往往都掺杂有其他形状的颗粒，但只要不超过1/3，就仍用一种粒形表示，否则用多种粒形表示。对树脂砂造型而言，粒形对强度的影响较为明显。在其他条件相同的情况下，圆形砂的紧实度高，砂粒的实际比表面积小，所以砂型强度比尖角形砂高很多。而且大量试验证明，树脂加入量相同时，圆形砂砂型的抗拉强度比多角形砂要高，因此PCM工艺选用圆形砂。

树脂砂造型对原砂的其他方面也有要求（见表6.16-1）：含泥量要求较为严格，因为泥分表面积大，会消耗掉大量的黏结剂，而且对发气性和强度不利；含水量过高会导致硅砂表面和呋喃树脂的表面浸润性能变差；酸耗值过大会使酸的额外用量增加，浪费材料；微粉会增大原砂的比表面积，使黏结剂用量增多，型砂的机械强度下降；pH值应较小，以加快反应过程；必须保证足够的SiO_2含量，以提高砂型的耐火度。

表6.16-1　树脂砂工艺对原砂的性能要求

要求	含泥量	含水量	酸耗值	微粉含量	pH值	SiO_2含量
指标（质量分数）	≤0.2%	≤0.2%	≤5	≤0.5%	≤5.5	≥94%

（2）黏结剂和催化剂

铸造行业用的树脂主要有酸硬化的呋喃树脂、酯硬化的碱性酚醛树脂以及胺硬化的脲烷树脂。在大量材料工艺试验的基础上，PCM工艺选定酸硬化的呋喃树脂作为黏结剂。

1）呋喃树脂及其催化剂　呋喃树脂的基本成分是糠醇，因其结构上特有的呋喃环而得名。按基本结构可分为糠醇树脂、脲醛呋喃树脂、酚醛呋喃树脂、甲醛呋喃树脂等。从树脂的成本、树脂砂的硬透能力、强度和脆性等方面考虑，脲醛呋喃树脂的性能都好于其他种类的树脂。PCM工艺所采用的是国内某厂生产的糠醇脲醛树脂（表6.16-2为该树脂的性能指标）。

表6.16-2　PCM工艺使用的糠醇脲醛树脂的性能指标

型号	密度/$g\cdot mL^{-1}$	黏度（20℃）/mPa·s	pH值	含氮量（体积分数）/%	游离甲醛（体积分数）/%	抗拉强度（24 h）/MPa
ZFS 3.0N-A-0.4	1.15~1.18	18	6.5~7.5	≤3.0	≤0.2	≥2.2

其生产过程如下：首先，使尿素和过量的甲醛在弱碱性介质中反应，生成一羟基甲脲和二羟基甲脲（无水和水合物）。然后，由二羟基甲脲和糠醇在弱酸性条件下发生缩聚反应而得到糠醇脲醛树脂。它在酸性催化剂的作用下，经进一步失水缩合或双键打开发生加聚反应，从而形成三维的交联结构而硬化。这种硬化反应从酸性固化剂与树脂一接触就开始，形成不可逆反应的聚合物，同时释放出缩聚水，直至树脂完全硬化为止。一般情况下放置24 h即可完全硬化。

根据上述硬化机理，影响呋喃树脂自硬砂硬化过程的主要因素有：树脂和固化剂的类型与加入量、原砂的性质、环境温度与湿度等。

温度和湿度对硬化反应有很大影响。一方面，它是放热反应，因此气温较高时，硬化过程释放出的热量不易被原砂和环境吸收，导致反应速度减慢，硬化不完全。一般环境温度在24℃比较好。温度对终强度也有一定影响，必须将其控制在一定范围内。另一方面，该硬化过程属于缩聚反应，会释放水分。缩聚水的排除及时与否，对树脂砂的粘接强度有很大影响。环境湿度高，会阻碍反应水的逸散蒸发，影响硬化反应的进行，降低强度。在常用的酸固化剂中，磷酸对湿度敏感性大，而对甲苯磺酸对湿度的敏感性小。

呋喃树脂对造型工艺影响最大的两个性能指标是它的含氮量和含水量。树脂中的氮是由尿素带入的。如果含氮量太高，在用于铸钢或高牌号铸铁件的浇注时，铸件可能出现氮针孔等缺陷。水分则由甲醛的水溶液带入，同时树脂的缩合反应也会释放出水。水分越高，则树脂砂的硬化越缓慢，强度也越低。针对不同的浇注金属，必须选用不同含氮量和含水量的树脂。表6.16-3可作为选用树脂时的参考指标。

呋喃树脂的硬化反应是纯催化自硬过程。固化过程中催化剂（固化剂）不产生化学消耗，而是机械地包含在聚合物的结构中。尽管如此，在使用不同种类的催化剂时，型砂的硬化性能和终强度仍然有很大差别。究其原因，是由于催化剂产生的质子浓度和活性不同，催化剂在树脂中的溶解性不同造成的。因此，在选定催化剂时，要充分了解催化剂的种类和物化特性。呋喃树脂用的催化剂分为无机和有机两大类。无机催化剂有磷酸、硫酸乙酯等，有机催化剂则包括各种磺酸，如对甲苯磺酸、苯磺酸和二甲苯磺酸等。

表 6.16-3　选用呋喃树脂的参考指标

铸件的材质		推荐采用的树脂	
名　称	牌　号	含氮量(质量分数)/%	含水量(质量分数)/%
灰铸铁	HT200～300	5～11	8～15
灰铸铁	HT400～500	0～4	0～10
球墨铸铁	各种牌号	0～4	0～10
铸钢	各种牌号	0～2	0～8
非铁合金	—	4～11	8～15

PCM 工艺对催化剂的要求如下：

① 足够快的硬化速度，足够高的硬化强度；

② 腐蚀性小，以利于输送和控制装置正常工作；

③ 粘度低，能从微孔中顺利喷出；

④ 含固体杂质少，不产生沉淀；

⑤ 长期储存时，环境温度在 0℃～45℃范围内，性能保持不变。

磷酸是最早使用的无机催化剂，它的催化速度较其他催化剂慢，但型砂的终强度和高温强度高。提高磷酸的浓度可以增强它的活性，但其黏度也大幅度增加。硫酸乙酯的催化速度最快，但酸性太强，容易对喷头和树脂膜造成腐蚀。有机磺酸具有酸度调节范围宽、固化速度可调节、固化后砂型（芯）强度高等特点。表 6.16-4 给出了不同催化剂对树脂砂型强度的影响。综合考虑上述因素，选用对甲苯磺酸作为 PCM 工艺的催化剂。表 6.16-5 是它的基本性能指标。

表 6.16-4　各种催化剂对树脂砂型强度的影响

催化剂		苯磺酸水溶液	对甲苯磺酸水溶液	硫酸乙酯	磷酸
不同时间的强度/MPa	2 h	0.75	0.35	0.68	0.18
	24 h	1.812	3.09	2.35	2.83

表 6.16-5　PCM 所用对甲苯磺酸的基本性能指标

型号	密度 /g·cm⁻³	黏度（20℃）/mPa·s	总酸度（以 H_2SO_4 百分数计）/点	游离硫酸（质量分数）/%
GS03	1.2～1.3	10～30	24～26	7.0～10.0

2）呋喃树脂对 PCM 工艺性能的影响　呋喃树脂影响 PCM 工艺的主要物化性能包括：含氮量、糠醇含量、游离甲醛含量、含水量、黏度及密度等。相对而言，含氮量、糠醇含量、游离甲醛含量的影响比较重要。

呋喃树脂中的含氮量对 PCM 工艺性能的影响主要有 4 个方面。

① 砂型的常温强度起初随含氮量的增加而提高，当含氮量增加到一定程度时，由于黏度增加而导致粘接膜分布不均匀，以致出现缺陷或包裹不完整而使砂型强度降低。

② 砂型的高温强度与树脂含氮量的关系则相反，含氮量越低，高温强度越高。

③ 呋喃树脂的含氮量增加，使砂型的韧性相对提高，有利于保证塑性，减少铸件表面的脉纹缺陷。

④ 含氮量高的树脂会使铸件产生氮针孔。以上 4 个因素之间存在矛盾，因此需要综合考虑。

糠醇含量与砂型性能的关系很大。糠醇含量增加时，砂型的强度增大，硬透性也增加，同时发气量减少，气孔缺陷减少。但如果含量过高，则砂型的脆性也增大。游离甲醛具有挥发性，挥发气体对人体有害，所以要严格控制其含量，一般控制在 0.3%（质量分数）以下。

PCM 工艺中的树脂用量比传统的树脂砂工艺要大，因此有必要对树脂用量较大时砂型强度的变化规律进行研究。砂型强度主要表现为黏结剂对硅砂面的附着力与使砂粒之间相互黏结起来的有效黏结剂量的乘积。所谓有效黏结剂量表现为砂粒之间的总黏结点数和砂粒表面树脂膜之间的“缩颈”大小，它取决于砂粒的比表面积、颗粒形状和黏结剂对砂粒表面的浸润性。

为了研究树脂用量和树脂砂强度的关系，通过试验测量了几组不同树脂用量时的树脂砂强度（见图 6.16-14）。试验采用标准的“8”字形试样和强度拉伸设备，树脂用量在 1%～5%（质量分数）之间逐渐增加。

从图中可以看出，树脂砂的绝对强度随树脂用量的增加而提高。树脂用量较低时，增加树脂用量则树脂砂绝对强度提高较快，而当树脂用量较大时，绝对强度增长趋缓。

通过分析可以得出结论：绝对强度的变化趋势受树脂膜形态的影响较大。树脂用量较小时，树脂膜难以保持连续且不完整。随着树脂用量的增加，树脂膜趋向完整而致密，所以强度增长较快。树脂用量增加到一定值以后，树脂膜开始出现缺陷，主要是裂纹和孔洞。初步分析，裂纹是在固化过程中由于硬化速度差别所引起的应力造成的。孔洞是由于硬化过程中，环境中的水分以及缩合反应产生的水分未能及时逸出而形成的。也有些孔洞是由于硬化反应放热导致硬化过快，形成沸腾现象而产生的。正是由于这些缺陷，导致强度增长趋缓。

呋喃树脂是高分子有机化合物，在高温下会迅速裂解为低分子气体。热分解的气体中包含有 O_2、N_2、CO、H_2、CH_4、H_2S、SO_2 等气体，这些气体在一定条件下会成为铸件表面气孔或异常组织缺陷的根源。呋喃树脂的用量和发气量之间存在如下关系：树脂用量越大，发气量越大，发气时间越长，但是不成正比。树脂含氮量越高，发气量也越大。另外，糠醇含量越高，发气量越小。

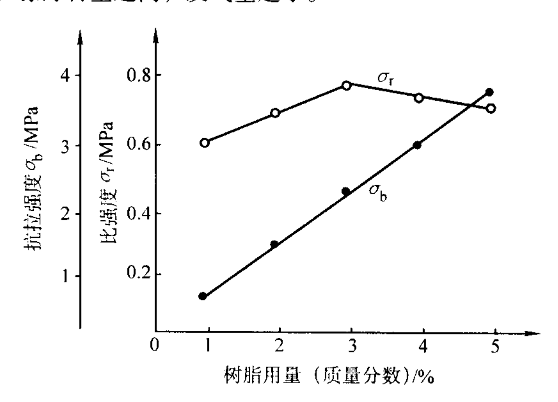


图 6.16-14　树脂用量和树脂砂强度的关系

3）对甲苯磺酸对 PCM 工艺性能的影响　对甲苯磺酸的主要物化性能包括：密度、黏度、总酸度、游离硫酸的含量等。试验发现，总酸度和游离硫酸的含量是两个非常重要的指标。总酸度是指固化剂中质子含量的多少，由于磺酸中的磺酸基为 $-SO_3H$，因此一般以 H_2SO_4 含量来计算总酸度。试验证明，总酸度和游离硫酸含量之间呈线性关系，总酸度提高，游离硫酸含量也相应提高。反之亦然。

对 PCM 工艺来说，对甲苯磺酸影响树脂砂强度和固化速度的最主要因素有两个，即催化剂的加入量以及催化剂中游离硫酸的含量。

树脂砂的交联反应是在对甲苯磺酸的催化作用下进行的，所以它的加入量对砂型强度有很大影响。当催化剂用量



很少时，其有效浓度不足以使树脂发生完全的交联反应，而且树脂发生交联反应时产生缩聚水，使得催化剂稀释，从而也减缓了反应的进行，故砂型强度偏低。随着催化剂用量的增加，砂型强度逐渐提高。在强度达到一定峰值以后，继续增加催化剂用量，则强度急剧下降。这是由于交联反应速率太高，结构不完整，导致粘接膜和粘接桥脆化而造成的。由此可见，不能为了追求硬化速度而盲目增加催化剂用量，而应该利用其峰值强度。图6.16-15给出了树脂砂抗拉强度和对甲苯磺酸加入量的关系，图中，BOS和BOR分别代表对甲苯磺酸和树脂在树脂砂中的质量分数。从图中可以看出，对于三种树脂用量，树脂砂的峰值强度都出现在催化剂用量（质量分数）为0.35%～0.4%的位置。因此，在造型过程中，必须严格控制催化剂的加入量。

为了研究树脂砂强度与催化剂中游离硫酸含量的关系，设计了一组正交试验。试验中，游离硫酸含量（质量分数）在1.5%～15%之间变化，测量树脂砂强度随时间的变化规律。试验结果见表6.16-6和图6.16-16。

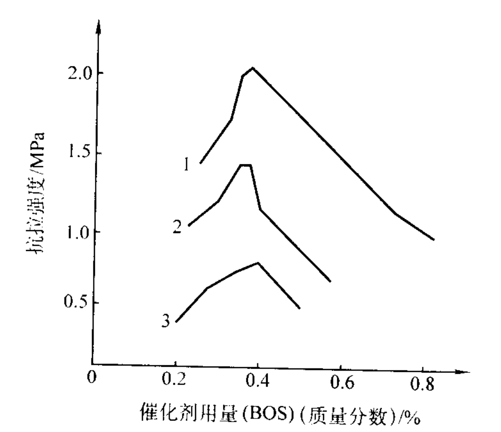


图6.16-15 树脂砂抗拉强度和催化剂用量的关系
1—树脂（BOR 3.5%）；
2—树脂（BOR 2.5%）；3—树脂（BOR 2%）

表6.16-6 游离硫酸含量对型砂固化性能的影响

游离硫酸含量（质量分数）/%	抗压强度/MPa							
	1 min	2 min	3 min	5 min	10 min	30 min	1 h	24 h
1.5	0.31	0.57	0.84	1.22	1.41	1.92	2.4	3.5
2.5	0.40	0.75	0.96	1.38	1.56	2.04	2.65	3.2
5.1	0.55	0.83	1.05	1.24	1.75	2.16	2.74	3.05
8.0	0.98	1.06	1.18	1.45	1.86	2.04	2.5	2.7
10	0.94	1.24	1.41	1.50	1.80	2.23	2.4	2.4
15	0.75	0.86	1.14	1.27	1.86	1.79	2.15	1.9

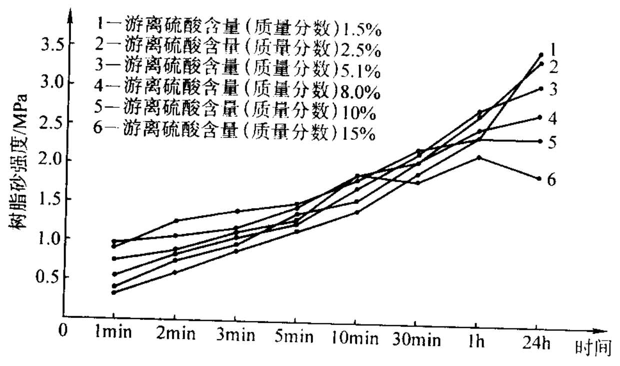


图6.16-16 游离硫酸含量与树脂砂强度的关系

从图6.16-16中可以看出，如果催化剂中含有较多游离硫酸（酸度值较大时），其活性增加，可以加速树脂砂硬化。同时，树脂砂固化的初强度提高，而终强度降低。但当游离硫酸含量超过10%以后，随着催化剂中游离硫酸的增加，树脂砂的初强度也开始下降。

4）偶联剂 呋喃树脂中添加少量的硅烷偶联剂，可以大大提高呋喃树脂砂的强度。目前对这种作用机理的解释是，它能降低砂型的吸潮性，改善树脂对型砂的浸润性，从而提高了砂型的机械强度，这已被实践所证明。

硅烷偶联剂是一种具有双重化学性质的物质。其分子结构中通常都含有两种不同的基团，一种基团亲无机物，具有强极性，另一种基团亲有机物，极性较小或非极性。它能分别与无机物（型砂）和有机物（树脂）相结合，从而把这两种性质差别很大的材料"偶联"起来，达到良好的粘接效果。

最适合呋喃树脂砂的偶联剂是γ氨基丙基三乙氧基硅烷。它的分子式是$H_2N\text{-}(CH_2)_3Si(OC_2H_5)_3$，商品名称为KH550。在树脂砂中加入少量KH550硅烷，可以明显提高树脂砂强度，降低吸湿性。图6.16-17是两种试验条件下砂型强度的比较。其中，条件1是加入（质量分数）0.8%树脂和（质量分数）0.2%硅烷，条件2是加入（质量分数）1.2%树脂，不加硅烷。可以看出，两种条件下砂型的终强度相同。因此，在达到同一砂型强度时，由于加入了偶联剂，在减小树脂用量的同时使砂型发气量也减小了。

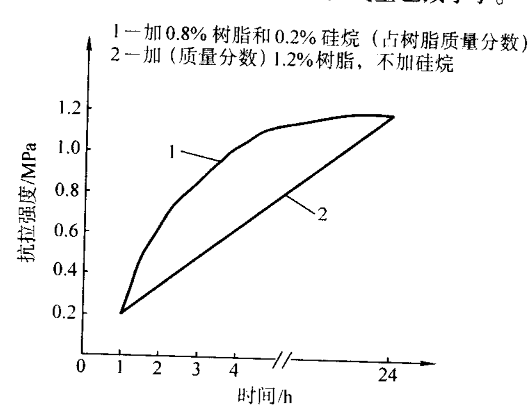


图6.16-17 硅烷偶联剂对砂型强度的影响

硅烷偶联剂在树脂中的加入量一般为树脂（质量分数）的0.2%～0.3%。随着树脂中KH550硅烷加入量的增加，呋喃树脂砂的强度进一步提高。当加入量（质量分数）为0.2%时，较未加硅烷时的强度提高77%。当加入量（质量分数）超过0.4%时，强度增长幅度趋缓。硅烷的加入方法以直接加入树脂中为好。但它在树脂中有水解倾向，因此硅烷在树脂中的作用时间有一定限制，一般有效期为5～7天。硅烷偶联剂对于不同含氮量的呋喃树脂，增强效果有所不



同。对无氮或含氮量较低的树脂，增强效果比较明显。表6.16-7说明硅烷对不同含氮量树脂的增强效果。

表 6.16-7 KH550 硅烷对不同含氮量树脂的增强效果

不同硅烷加入量时的抗拉强度/MPa	无氮树脂	低氮树脂	中氮树脂
未加硅烷	0.35	1.43	2.1
加 0.3%（占树脂质量分数）硅烷	2.31	1.92	2.7

2.1.4 PCM 设备

以 PCM 工艺原理为基础，对基本工艺过程进行分解，可以得到铸型制造过程的各个子过程及相应的运动控制信息。根据运动控制信息可以设计出实现基本运动的控制系统类型及软硬件结构，然后在控制系统确定的条件下建立执行控制信息的机械系统。这是设计开发 PCM 设备的总体思路和基本流程。自上而下，可将整个系统分为四个层次，最高层为工艺原理层，其次是信息处理层（即软件系统层），再其次是控制系统层，最底层是机械系统层，如图 6.16-18 所示。

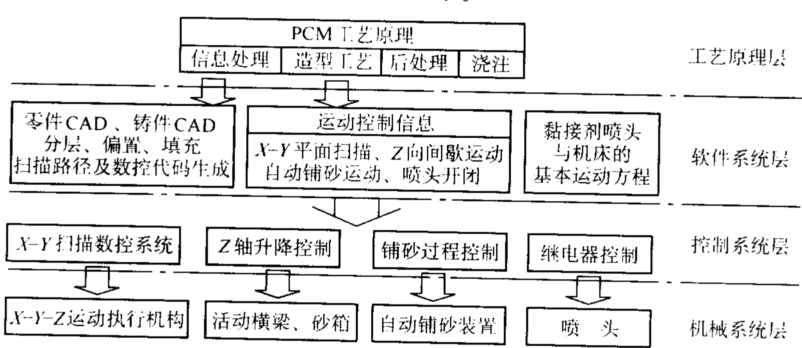


图 6.16-18 PCM 设备设计流程图

按照工艺流程可以将 PCM 技术划分为 4 个顺序基本子过程：信息处理过程、造型过程、后处理过程和浇注过程。其中，信息处理过程是为造型过程准备好相应的控制程序（数控代码）文件，造型过程利用信息处理过程所生成的数控代码，驱动造型设备，完成铸型的数控加工。后处理过程旨在提高铸型表面质量和浇注工艺性能，降低树脂含量，为浇注过程创造条件。浇注过程则是把完成后处理的铸型运往浇注车间，将高温熔融的液态金属注入铸型的浇注系统和型腔内部，最终凝固形成具有一定表面质量、精度和复杂程度的合格铸件。

PCM 工艺中黏结剂喷头的运动轨迹是层层累积的平面扫描线，所以得到的运动控制信息主要包括 $X-Y$ 平面扫描轨迹，Z 向间歇运动等。

铸型制造过程中的运动控制信息决定了控制系统的类型和结构。主要运动轨迹是 $X-Y$ 平面的轮廓扫描及 Z 轴间歇运动，为保证 X、Y、Z 三轴的精确控制，采用数字控制系统，X、Y 两轴联动，运动方式要求轮廓控制；Z 轴运动只需点位控制方式即可实现。其次，在成形过程中，黏接剂不可能始终持续喷射，喷头还必须进行开启/关闭的状态转换，因此采用继电器控制。另外，铺砂过程必须严格控制铺砂量及型砂孔隙率，精确控制铺砂装置的开启角度、开启时间及运动速度，因此需要采用步进驱动系统进行点位控制。最后，在控制系统确定的条件下设计开发执行控制信息的机械系统。

PCM 工艺的造型过程可以划分为三个更具体的子过程：扫描加工过程、铺砂过程和工作台升降过程。扫描加工是由工控机向数控系统发送程序文件，驱动 $X-Y$ 扫描机构完成层面加工；铺砂过程（造型材料供应系统）需要在自动铺砂装置与 Z 轴工作台升降系统的配合下完成工作台（活动横梁及可伸缩式砂箱）上升，留出预定的铺砂空间，再由铺砂装置进行铺砂，通过 Y 轴牵引机构带动压辊装置对型砂进行铺平、紧实，完成铺砂操作；工作台升降过程是由 Z 轴步进系统驱动活动横梁及可伸缩式砂箱，精确上升至预定的工作高度，完成加工方向上工作台的位置调整。这三个子过程循环进行，直至造型过程结束。

通过对工艺要素的进一步分解，就可以得到 PCM 设备机械系统各子系统的具体结构和功能（如图 6.16-19）。

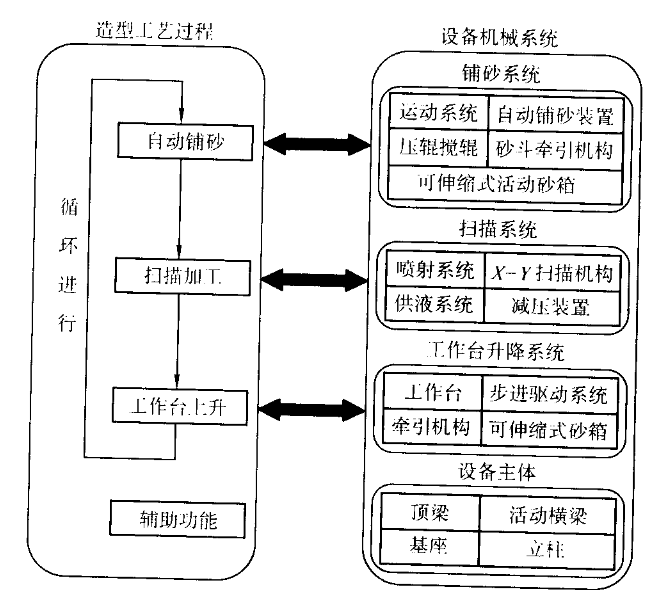


图 6.16-19 PCM 造型过程和设备机械系统子系统之间的对应关系

北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司与广东佛山峰华自动成形设备公司合作，在北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司第一代、第二代 PLCM－1000 基础上完成了商品化的设备开发。商品化的设备为 PLCM－1500 型，见图 6.16-20。

PLCM－1500 型机器的主要技术参数见表 6.16-8。

2.1.5 铸型的后处理

PCM 工艺制造的铸型必须经过后处理才能运往铸造车间进行浇注。后处理工艺是否合理，不仅对铸件的最终质量有很大影响，而且还决定了浇注过程是否能顺利进行。因此，铸型后处理工艺的重要性不亚于造型工艺和浇注工艺。

具体说，PCM 铸型后处理工艺包括：清砂、表面整修、型腔表面敷涂料、焙烧（喷烧）、合型装配（胶合）等步骤。

（1）清砂和表面修整

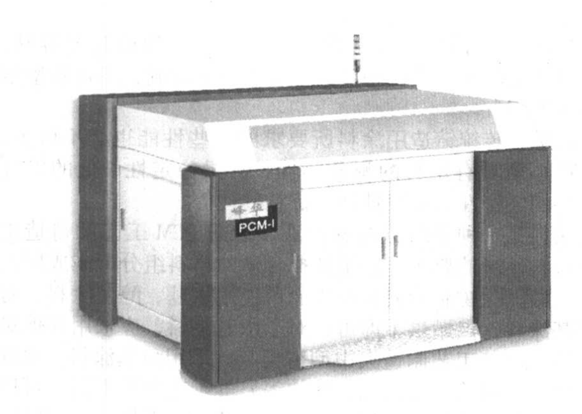


图 6.16-20　PLCM－1500 型设备外型图
（广东佛山峰华公司提供）

表 6.16-8　PLCM－1500 技术参数表

参数	PLCM－1500 性能指标
最大成形空间/mm	1 200 × 1 000 × 750
X、Y 轴扫描速度/$mm \cdot s^{-1}$	400～600
X、Y 轴扫描加速度/$mm \cdot s^{-2}$	30
层厚/mm	0.2～0.5
扫描精度/mm	± 0.08
工作寿命/h	15 000
功耗/kW	3
外形尺寸（不包括轨道）/mm	2 200 × 2 050 × 1 640

PCM 铸型的型腔内部在造型结束后充满了未固化的松砂，必须进行清理。对于小型和形状不复杂的铸型，只要将铸型倒置，就可将内部松砂倒出，然后再用刷子将内腔表面附着的余砂清理干净。对于大型不易翻转的铸型、以及型腔复杂狭窄不易清砂的铸型，则需采用真空抽吸法，将型腔内的干砂清理出来。

型腔内部的干砂清理完毕之后，需要对铸型进行局部整修。在造型过程中，影响成形精度的诸多因素可能产生轻微波动，导致型腔内部产生某些缺陷，如结瘤、扩散不均和过度渗透等。例如因扫描速度在轮廓尖角处发生变化，而液体流量不变所产生的"结瘤"现象，因型砂表面各处紧实度有差异，而黏接剂流量恒定导致扩散不均所产生的"毛刺"现象，因扫描速度和液体流量不匹配所引起的"过喷"现象。这些缺陷会导致铸型表面粗糙，无法达到精度要求。

上述缺陷可以通过局部整修来弥补。具体的弥补措施是采用一些修磨工具如锉刀、砂轮等，对铸型表面（特别是型腔表面）的结瘤等粗糙部分进行整修打磨，以保证最终铸件的表面光洁度。

实验发现，表面整修最好在铸型达到终强度之前进行。因为此时铸型强度较低，修整难度小。但必须注意，铸型不能从砂箱中过早取出，否则可能因强度低而导致铸型变形较大甚至破坏。实验证明，根据铸型大小和壁厚不同，以造型完成后 3～6 h 后取出为宜。

（2）铸型的焙烧（喷烧）

PCM 工艺制造的铸型需进行焙烧（喷烧）的后处理工艺。将铸型置于恒温装置（例如烘箱）中，在一定温度下保温一定时间，使铸型表层和内部所含树脂的某些成分分解、逸出，这个过程称之为焙烧。焙烧工艺能有效降低铸型的树脂含量，减小浇注时的发气量，为浇注成功创造有利条件。

在焙烧过程中，铸型表面和内部达到一定温度时，树脂中的某些成分（低挥发点和低分解点的成分）开始分解。如尿素甲醛的分解温度为 163℃。当铸型中的树脂分解到一定程度时，浇注过程的发气量将会显著减小。

在实际操作中，需要确定的主要参数是焙烧的温度和时间。这取决于铸型所必需的终强度。焙烧温度越高，保温时间越长，分解逸出的树脂也越多，但同时铸型强度的降低也越明显。对于树脂含量为 2% 的铸型来说，如果焙烧时间为 2 h，其终强度和焙烧温度的关系如表 6.16-9。

表 6.16-9　铸型终强度和焙烧温度的关系（树脂含量 2%，焙烧时间 2 h）

焙烧温度 T/℃	初始强度（无焙烧）	$T = 100$	$T = 150$	$T = 200$	$T = 250$	$T = 300$
铸型终强/MPa	1.84	1.47	0.6	0.4	强度过低，已经无法测量，铸型发生开裂	

上述实验说明，焙烧温度和时间受到铸型强度的制约，两者之间存在矛盾，必须通过实验寻求平衡点。由于 PCM 铸型的树脂含量和发气量远高于一般树脂砂铸型，因此，焙烧的基本原则是，在保证铸型终强度的前提下，尽可能采用较高的焙烧温度和较长的保温时间。

为寻求焙烧的最佳条件，设计了一组正交实验。焙烧温度为 100～300℃，时间为 1～3 h。通过实验测量，得出了焙烧后铸型的发气量与焙烧时间及焙烧温度的关系（如表 6.16-10 和图 6.16-21）。从图表中可以看出，焙烧温度 200℃以上、焙烧时间 1.5 h 以上时，铸型发气量稳定在 20 mL/g 左右。因此，综合考虑发气量和铸型终强度要求，在焙烧温度 250℃下焙烧 2.5 h 将是最佳焙烧条件。此时，既能有效地减小发气量，铸型终强度也可满足要求。

表 6.16-10　不同焙烧时间和焙烧温度之后树脂砂的发气量　$mL \cdot g^{-1}$

焙烧温度 \ 焙烧时间	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h
100℃	—	—	34	34	32
150℃	30	29	27.5	27	26
200℃	29	28	21	22	21.5

续表 6.16-10

焙烧温度 \ 焙烧时间	1 h	1.5 h	2 h	2.5 h	3 h
250℃	22	21	20	19	20
300℃	20	20.5	19.5	20	18

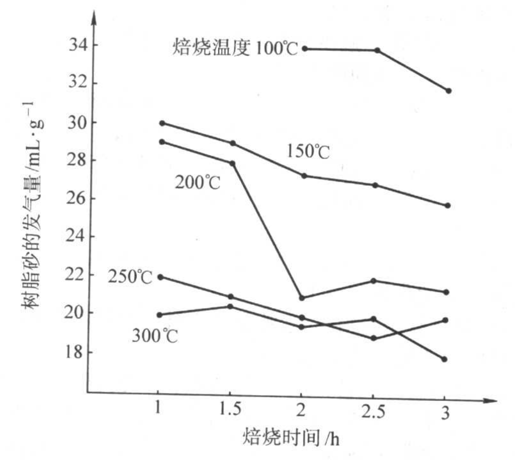


图 6.16-21　焙烧后铸型的发气量与焙烧时间及焙烧温度的关系图

PCM工艺主要针对大中型铸型的制造。对于大型铸型来说，其焙烧后处理过程需要专用的焙烧设备，如大型烘箱或大功率加热及温控装置。这样一来，不仅提高了工艺的成本，而且增加了铸型吊装和搬运过程的操作难度。另外，频繁的移动也容易造成铸型的损坏。因此，中小型铸型可以采取焙烧工艺进行处理，大型铸型则必须寻求其他更为简单易行的方法。

可以针对铸型中树脂的分布特点，采用汽油喷枪或喷灯等喷烧装置，对铸型型壁表面进行喷烧处理，将型壁表层中的部分树脂烧除，这种方法同样能达到降低铸型整体树脂含量的目的。对于大型铸型来说，此法简单易行，而且不需要大型烘烤设备。在节省成本的同时，也避免了铸型的频繁搬运和损坏。值得注意的是，焙烧（喷烧）过程中分解逸出的树脂气体刺鼻难闻，会对环境造成一定污染。因此，焙烧（喷烧）过程必须在密闭、或者通风条件良好的环境中进行。

(3) 涂料性能及涂敷方法

铸型表面涂敷涂料是影响铸造过程和铸件表面质量的重要环节。在PCM工艺中，涂料的作用有以下几点。

1）提高铸件表面质量，降低粗糙度。涂料能在一定程度上填补砂型表面的凹坑，使铸型表面波峰和波谷的偏差减小。另外，PCM工艺制造的铸型沿Z向存在“台阶”效应。涂料充填在台阶的凹隙中，可以减弱台阶效应，使铸件表面更光滑（如图6.16-22所示）。

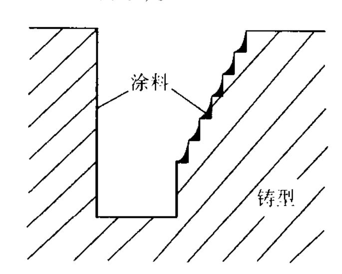


图6.16-22 涂层使铸型表面光滑

2）减少铸件粘砂等缺陷。浇注金属时温度很高，金属与铸型中的树脂发生化学反应，结果可能造成铸件表面缺陷，如粘砂、麻点等，这是一种由金属本身决定的粘砂现象。在浇注过程中，涂料可以在型腔壁形成有利气氛，使砂层易从铸件表面剥离，从而达到铸件表面无粘砂、易清理的目的。

3）防止异常组织的形成。采用酸自硬呋喃树脂砂时，苯磺酸热分解析出的硫系气体常使球铁件表层出现异常组织。采用氧化钙和硅酸二钙涂料可防止异常组织的形成，因为此涂层可屏蔽因树脂分解形成的硫系气体，而且其分解产物对硫系气体又能起到吸收作用。

4）加固型砂、减少浇注时的冲砂现象。涂料可以提高型芯表面强度，加固砂型。

5）PCM砂型发气量大，涂层对金属液与树脂砂有一定的隔离作用。一方面可以降低砂型的温度，使发气量减少。另一方面，涂料还可以在一定程度上阻止树脂分解产生的气体向型腔内扩散。因此，涂料对铸件质量有至关重要的作用。

结合PCM工艺制造铸型的特点，在实验中发现，涂料要发挥应有的作用必须具备一定的性能。

1）悬浮稳定性好　配制好的涂料在存储和使用过程中，一定时间内不发生沉淀和分层。

2）具有合适的渗透性　铸造工艺一般要求涂料渗入砂型（芯）表面达1.5～3倍砂粒直径。渗入深度太浅，涂层与砂型表面的附着强度低，容易产生裂纹；渗入太深会使留在表面的涂层太薄，起不到应有的效果。

3）有一定的触变性、涂挂性　涂料在涂敷时要容易，涂痕可自动消失，涂在垂直面上也不向下流淌，不在砂型型腔底部堆积。

此外，传统铸造用涂料所要求的一些性能也必不可少，如涂料必须具有足够的耐急热性、高温稳定性、低的发气性、好的气密性、储存性以及抗粘砂性等。

涂料是一种多组分的悬浊液，根据PCM工艺和铸造工艺对涂料性能的要求，必须选择合适的材料组分配制成所需涂料。酸固化树脂砂的铸型表面可使用水基、醇基涂料。对于醇基涂料，点燃烘干即可；对于水基涂料，应采用其他烘干措施。PCM工艺制造大中型铸型应该采用醇基涂料。根据浇注温度和材质（如铸钢、铸铁等）等工艺参数不同，可以采用不同的耐火材料（如锆英粉、石英粉、石墨等）、载体、悬浮剂（如有机膨润土）和黏结剂（如树脂、硅溶胶等）。根据需要将这些组分按一定比例以正确的步骤混合，搅拌均匀后就可以使用。国内外很多研究机构和工厂都很重视树脂砂造型涂料的研究，并获得了一定的经验。

目前，PCM工艺采用醇基锆英粉涂料，其优良的性能能够满足工艺要求。从涂挂实验发现，浅色锆英粉涂料无论从涂挂性、触变性、耐火度和清理的方便性等方面都优于黑色石墨涂料。但锆英粉涂料价格较高，铸钢件、大型铸件应采用锆英粉涂料，中小型铸铁件为降低成本可采用石墨涂料。

涂料的使用方法主要有刷、浸、喷、淋、溢流等。不同涂敷方法的采用取决于砂型的生产批量、形状大小和复杂程度。刷是涂敷涂料最常用的方法，刷可以使涂料的渗入深度较大，但刷涂需要有熟练的技术，而且一些复杂内腔不易刷涂。浸是将涂料液倒入砂型内，或将砂芯浸沉在涂料槽中，经过一段时间将涂料液从砂型中倒出或将砂芯从槽中取出，再用一定方法将多余涂料去除。这种方法适合大型及型腔复杂的砂型（芯），而且容易得到光洁的涂层表面。喷是使用压缩空气及喷枪使涂料雾化的涂敷方法，适用于大面积的型（芯）表面，这种方法需要专用的压缩和喷射设备。淋涂是用泵打击涂料经喷嘴将其喷淋在砂型（芯）表面，淋涂不同于喷涂，淋涂会出现多余的涂料，需要将多余涂料回收再利用。喷、淋方法效率高，适于工业生产。在PCM工艺中，多用刷和浸两种方法。大中型铸型一般采用刷涂，小型铸型若尺寸大小合适，最好采用浸涂的方法。

上涂料时，要根据铸件的材质、壁厚、砂型的表面状况等因素综合考虑涂料层的厚度。如果涂料层太薄，铸件的表面质量无法满足要求；如果涂料层太厚，又会使施涂工作量增大，成本增加。可以表6.16-11为参考，选择适合的涂料层厚度。另外，每次施涂的厚度以不超过0.30 mm为宜，需较厚的涂料层时，应分层多次施涂。而且，再次施涂时应在前一层涂料载体基本脱除之后进行。

表6.16-11 不同壁厚铸件的涂料层厚度参考

铸件类型	薄壁铸件	中型铸件	厚壁铸件	特厚铸件
涂料层厚度/mm	0.15～0.30	0.30～0.75	0.75～1.0	1.0～2.0

由于PCM工艺现阶段采用的是醇基锆英粉涂料，而且对大中型铸型来说，涂敷涂料的过程需要耗费一定时间，因此涂料中的酒精会很快挥发。为使涂料渗入砂型（芯）表面并保持一定厚度，使涂层与砂型表面具有足够的附着强度，必须在涂敷涂料之后，将酒精均匀涂（刷）在铸型表面，点燃烘干。

完成上述所有的后处理工序之后，就可将上、下型合型装配（胶合）或直接将砂型放入有衬砂的砂箱中，浇注金属制造铸件。过去传统铸造工艺常采用加压铁或使用夹紧装置紧固两个半型。不仅劳动强度大，而且会导致壳型变形，铸

件在分型面处毛刺较多。现代铸造采用胶合剂将两个半型粘合后浇注，减少了砂型的变形，同时在一定程度上弥合了分型面的间隙，使铸件毛刺减少。

铸型的装配将直接影响铸件的精度和浇注的成败。在 PCM 工艺中，铸型结合面和芯头配合面的四周，均采用封箱膏密封，防止金属液流入，造成破缝，影响砂芯气体的排除和造成铸造缺陷。

2.1.6　浇注实验

1）轴承座　图 6.16-23 为轴承座铸型浇注后所得的铸件（质量约为 20～25 kg）。其中，铸型尺寸为 540 mm × 350 mm × 240 mm，铸件则达到 440 mm × 250 mm × 140 mm。该轴承座的内孔由三个相交的弧形自由曲面组成，采用传统造型方法时使用木模，单件制造成本较高。PCM 工艺造型时，采取上、下型分体造型的方法，上、下型分别制造，铸型的冒口设置在上型，合型装配完成后，铸型上表面和型芯顶部均钻有排气孔，以提高砂型的透气性。采取底注方式进行浇注，能保证浇注过程中液流平稳、型腔排气通畅、脏铁液容易上浮。PCM 工艺中的铸型制造过程简单，后处理和装配方便，充分体现了其工艺的柔性和优越性。

采取上述措施后，浇注时发气量较小，浇注过程顺利平稳。从图 6.16-23 中可以看出：铸件外观和表面光洁度均较好，基本无毛刺，尺寸精度达到要求，内部组织正常，无粘砂等缺陷。

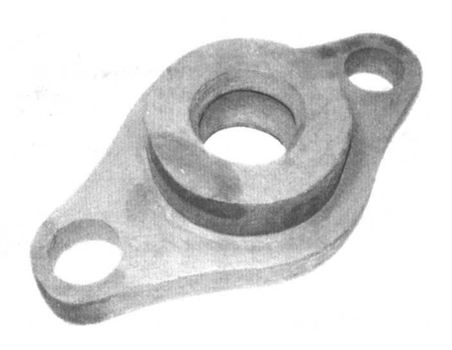
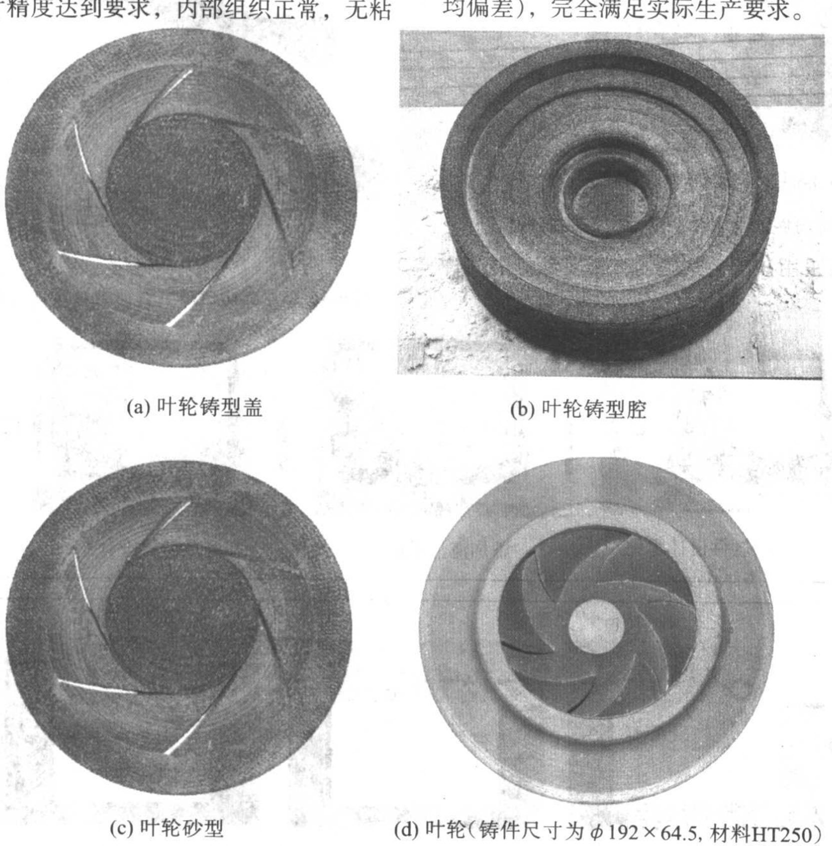


图 6.16-23　浇注后所得的轴承座铸件
（清华大学激光快速成形中心提供）

2）水泵叶轮　图 6.16-24 所示为一个用于实际生产的实例，它是用于渤海某海上钻油平台的水泵叶轮的铸型和铸件。由于该叶轮是异型叶轮，所以需要全新设计。使用传统工艺，包括制模、翻型和铸造，需要两个月。而采用 PCM 工艺，从设计到铸件完成，只花了 2 个星期，大大快于传统工艺，分层厚度为 0.3 mm。据测量，铸件尺寸精度达到 CT9～CT8 级，表面粗糙度达到 R_a25～12.5 μm（轮廓算术平均偏差），完全满足实际生产要求。



(a) 叶轮铸型盖　(b) 叶轮铸型腔

(c) 叶轮砂型　(d) 叶轮（铸件尺寸为 ϕ192 × 64.5，材料HT250）

图 6.16-24　叶轮铸型及叶轮（北京殷华公司提供）

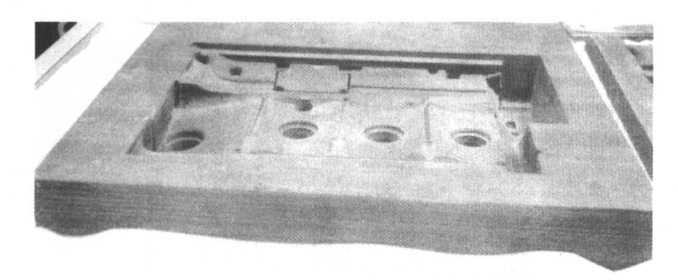
3）发动机铸件　图 6.16-25a 所示为采用微滴喷射直接 RP 铸型制造技术制造出的发动机铸件铸型，图 6.16-25b 为采用图 6.16-25a 所示铸型浇注的发动机铸件。

4）发动机排气管　图 6.16-26a 所示为采用微滴喷射直接 RP 铸型制造技术制造出的排气管上型铸型，图 6.16-26b 为排气管下型铸型，图 6.16-26c 为排气管芯子铸型，图 6.16-26d 为排气管浇注件。

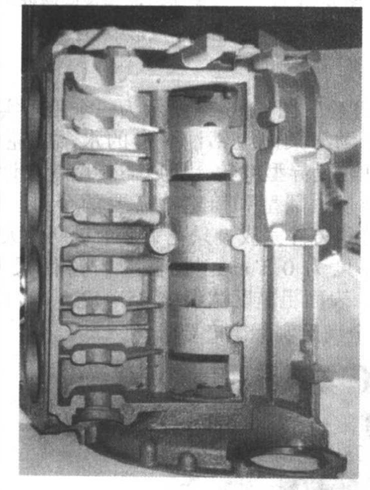
2.2　直接壳型铸造工艺（DSPC）

直接壳型铸造 DSPC（Direct Shell Production Casting）工艺为美国 Soligen Technologies Inc. 采用美国麻省理工学院（MIT）的 3DP 专利而开发的直接 RP 铸型制造工艺。

该技术使用陶瓷粉末为造型材料，粘接材料使用硅溶胶。由于陶瓷粉末颗粒尺寸在 75～150 μm 之间，所以 DSPC 工艺造型的表面质量较高，但这种硅酸盐水溶液分层粘结起来的陶瓷铸型强度较低，必须经过焙烧之后才能用于浇注金属，由于陶瓷型的特点，DSPC 工艺不适合大中型铸件的生产。而 PCM 砂型工艺正好相反，它正适合大中型铸型制造。图 6.16-27 是直接壳型铸造 DSPC 工艺示意图。图 6.16-28 是



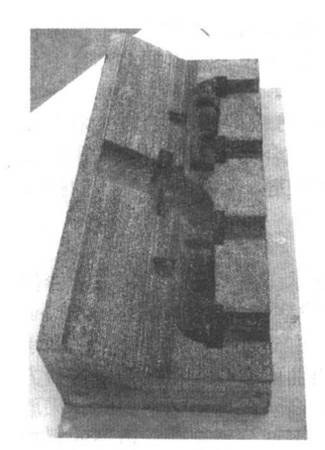
(a) 微滴喷射直接RP铸型制造的发动机铸件铸型



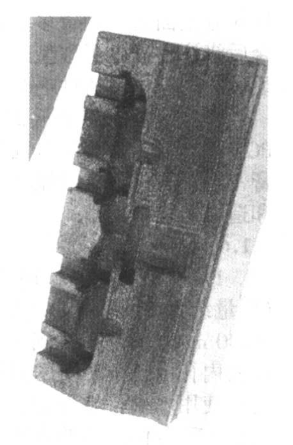
(b) 浇注的发动机铸件

图 6.16-25　发动机铸件的砂型及浇注后所得的铸件

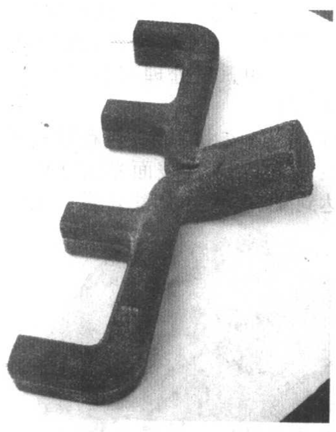
直接壳型制造的铸型及采用该工艺制作的汽车发动机进气管铸件。



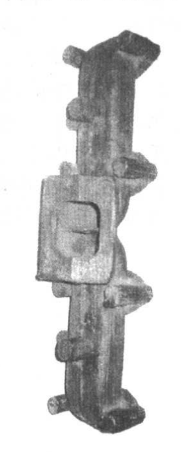
(a) 排气管上型铸型



(b) 排气管下型铸型

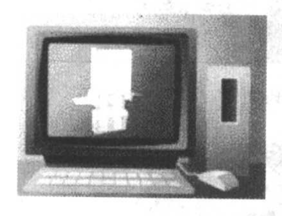


(c) 排气管芯子铸型

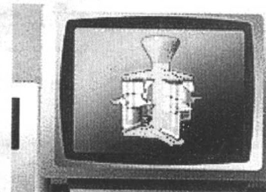


(d) 排气管浇注件

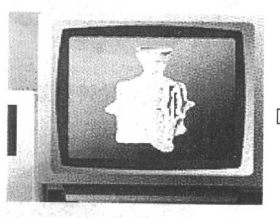
图 6.16-26　发动机排气管铸型及铸件（佛山峰华自动成形公司）



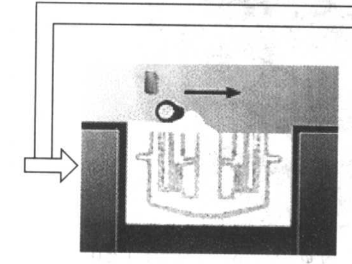
CAD软件设计零件



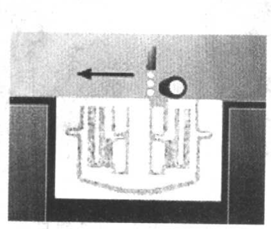
添加浇注系统



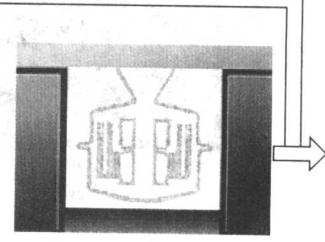
完成铸模设计



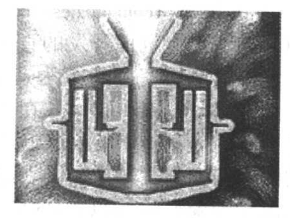
加工流程：铺陶瓷粉



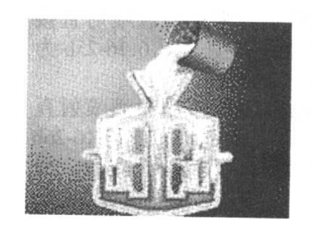
加工流程：喷洒黏结剂



加工流程：逐层加工直至铸模完成



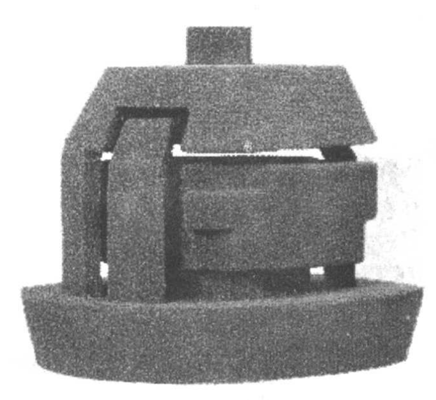
清除未黏结的陶瓷粉末而获得铸型



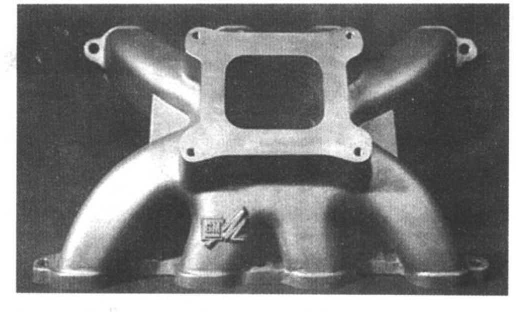
焙烧，浇注

图 6.16-27　直接壳型铸造 DSPC 工艺示意图（www. . soligen. com/technical-n. shtml）





(a) 铸型



(b) 发动机进气管铸件

图 6.16-28　直接壳型铸造工艺制造的铸型及铸件

Soligen Inc. 创立于 1991 年，是最早成立的采用 RP 技术进行精密有色金属铸件生产服务的公司。由于无需木模，由铸件 CAD 模型直接驱动设备制造陶瓷型，因而具有极大的柔性，大大减少了投放市场的等待时间，特别适于精密、中小批量的铸件生产。该公司被誉为铸造生产的"Parts Now TM Division"。由于 RP 设备制造商间激烈的竞争以及精密铸件服务的良好效益，目前该公司的主要业务已由设备生产转向精密铸件生产服务。其服务领域扩大到汽车、空间工程、计算机零件和医学领域的精密有色金属铸件。铸件尺寸在 300 mm × 300 mm × 300 mm 以内。

Soligen公司生产的专用设备 DSPC-300 技术参数见表 6.16-12。

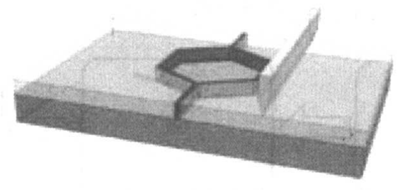
表 6.16-12　DSPC-300 技术参数表

工艺	DSPC
XY 运动系统分辨率/mm	0.05
成形室尺寸/mm	304 × 304 × 304
层厚/mm	0.178
堆积速度（垂直方向）/$mm \cdot h^{-1}$	12.7 ~ 19
机器尺寸/m	2.300 × 1.300 × 2.600
功率	10 A，110 ~ 220 VA（C）

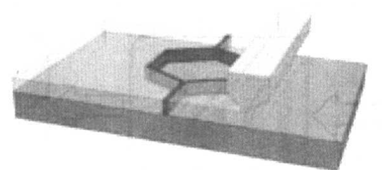
2.3　Extrude Hone® Prometal RCT

位于德国 Augsbrug-Lechauren 的 Generis 公司采用微滴喷射技术喷射黏结剂黏结型砂（陶瓷）而完成铸型制造，该公司成立于 1999 年。2000 年 Generis 公司和 Soligen Technologies 达成合作协议，Generis 公司取得 MIT 的 3DP 专利许可，在北美市场上销售其产品。现在，Generis 公司已经成为了 Extrude Hone 公司的一个部门，称为 Prometal，工艺路线称为 RCT（Rapid Casting Technology）。

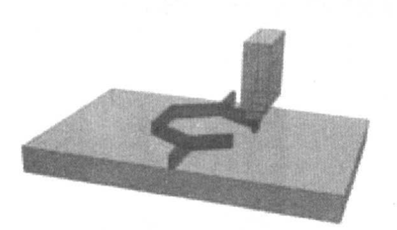
其工艺路线是将砂粒铺平之后，先用多通道喷头向砂床均匀喷洒树脂，然后由一个喷头依据轮廓路径喷射催化剂，催化剂遇树脂后发生交联反应，使铸型层层固化堆积成形，其工艺原理图如图 6.16-29 所示。该工艺砂箱尺寸可达 1 500 mm × 750 mm × 750 mm，分层厚度可达 0.3 mm，可用于制造大中型铸型，但其缺点是十分明显的，由于树脂喷洒在整个砂床表面，铸型制作完毕后是在含有树脂的砂包围之中，这样给后续取砂型和清砂带来困难，需特殊处理工序，同时也影响了砂型的精度和表面质量。图 6.16-30 为设备外观，图 6.16-31 为制造的铸型、铸件。



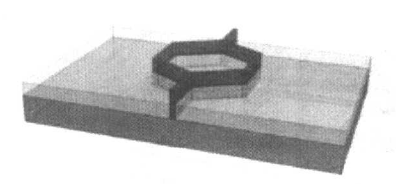
(a) 铺砂



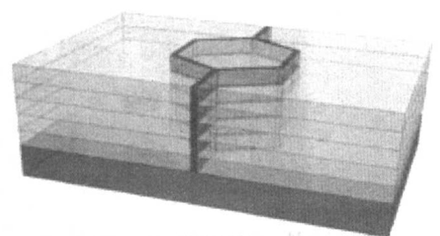
(b) 在砂床上整体喷树脂



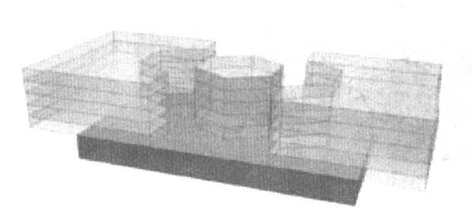
(c) 单喷头喷催化剂



(d) 完成一个层面



(e) 层层叠加



(f) 去除余砂获得砂型

图 6.16-29　GS 成形工艺示意图（来自 www.generis.de）

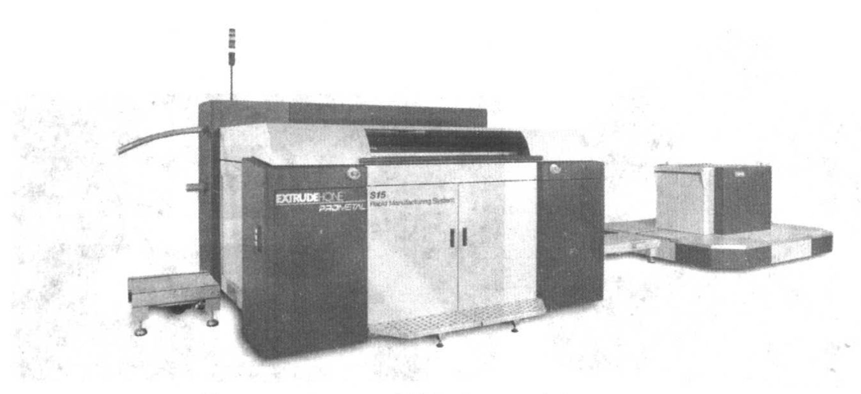


图 6.16-30　Prometal 最新设备 S15（来自 www.prometal-rt.com）

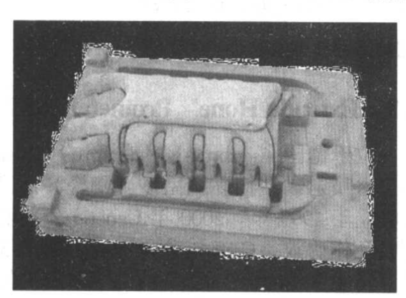
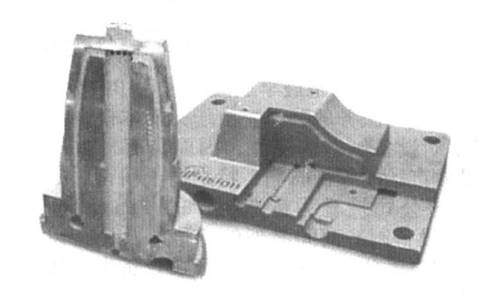



图 6.16-31　RCT 工艺制造的铸型与铸件（来自 www.prometal-rt.com）

Prometal 最新推出的设备名称为 S15，其主要参数见表 6.16-13。

表 6.16-13　S15 型设备工艺参数表

设备型号	S15
成型空间（$L \times B \times H$）	1 500 mm × 750 mm × 700 mm
厚度	0.15 ~ 0.4 mm
分辨率	0.2 mm
精度	0.1%
设备轮廓尺寸（$L \times B \times H$）	3 100 mm × 3 550 mm × 2 500 mm
质量	2 000 kg
装机功率	5 kW，400 V，3 × 16 A
控制系统	Pentium III，500 MHz
操作系统	Windows NT 4.0
数据界面	CLI

2.4　Z Cast Direct Metal Casting 工艺

Z Corp 公司将 3DP 工艺以及与铸造工艺相结合，推出了 Z Cast Direct Metal Casting 工艺。完成铸型的 CAD 模型后，利用它们开发的 3DP 设备获得分部件的壳型及型芯，然后将这些壳型及型芯的部件组装起来，形成铸造用的铸型，Z Corp 声称除了时间上大大节省之外，在价格上也有可与传统的铸造工艺相竞争的优势。Z Corp 在将铸型分解成若干部分的专用软件方面进行了大量的研究及开发工作，并已完成。图 6.16-32 是其工艺流程图，图 6.16-33 是 Z402 设备外观图，图 6.16-34 是获得的铸型及铸件。

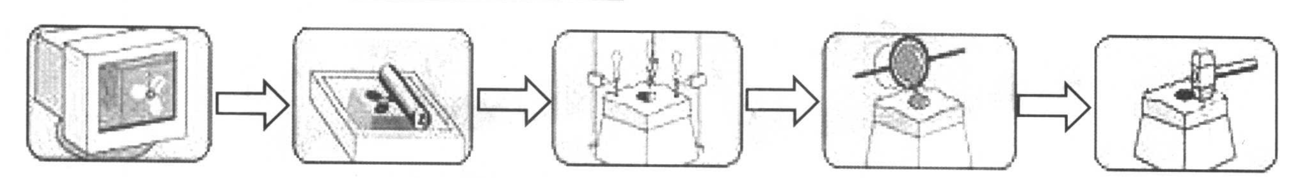


图 6.16-32　Z Cast Direct Metal Casting 工艺原理图（http://www.zcorp.com）



图 6.16-33　Z Cast Direct Metal Casting 工艺的设备 Z402

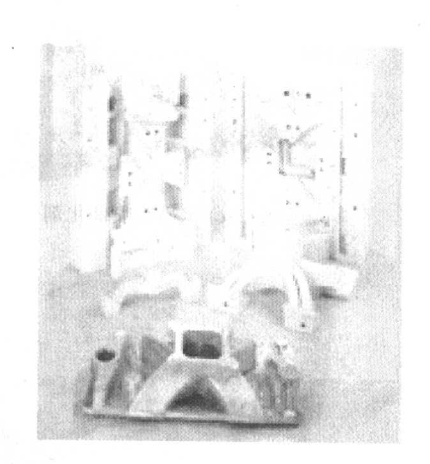


图 6.16-34　Z Cast Direct Metal Casting 工艺获得的铸件（http://www.zcorp.com）



Z402 型设备工艺参数见表 6.16-14。

表 6.16-14　Z402 型设备工艺参数表

设备型号	Z402
成型空间	203 mm × 254 mm × 203 mm
厚度	0.076 ~ 0.254 mm
设备轮廓尺寸	740 mm × 910 mm × 1 070 mm
重量	136 kg

3　基于激光的直接 RP 铸型制造

3.1　基于 SLS 工艺的直接 RP 铸型制造

3.1.1　覆膜砂 SLS 铸型制造

覆膜了树脂的砂粒材料称为覆膜砂，覆膜砂的激光烧结属间接 SLS 过程。覆膜砂 SLS 铸型制造工艺流程如图 6.16-35 所示。

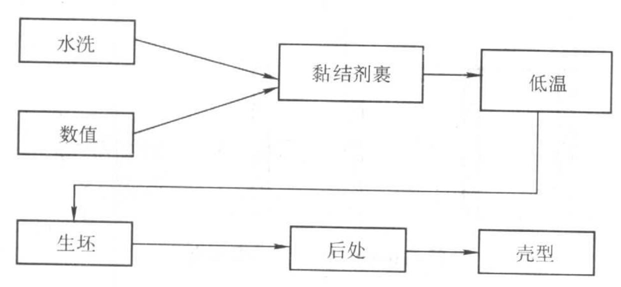


图 6.16-35　覆膜砂 SLS 铸型制造工艺示意图

覆膜砂通过激光烧结成形后，一般并不需要为增加强度、减少树脂含量的再烧结步骤，通过 SLS 工艺所获得的"绿件"壳型可以直接用来浇注，只要壳型的强度足够高，且其中的树脂含量足够低（例如小于材料总量的 1%）即可。但必须指出，如何选择正确的树脂粘结剂的配方以及合适的不同粒度级配的砂粒，通过混砂机的正确操作得到适用于激光烧结成形的树脂覆膜砂，都是非常重要的环节。特别是当铸造砂的来源不同时，相关的工艺参数变化很大。

在激光烧结时，为了提高烧结质量，如果选用的树脂量较高，则还需要一个不完全的脱粘工艺步骤。

1）材料　工程上一般按照下列标准将用于 SLS 工艺的粉末材料划分等级（见表 6.16-15）：

表 6.16-15　粉末等级划分标准

粒度	等级
> 10 mm	粒体
10 mm ~ 100 μm	粉粒
100 μm ~ 1 μm	粉末
1 μm ~ 10 nm	细粉末或微粉末
10 nm	超微粉末

树脂覆膜砂，一般采用粉粒的粒度，但是还要考虑粒度级配。树脂覆膜砂通常采用机械混合形成，即将树脂黏结剂粉末与金属或陶瓷粉末按一定比例机械混合，制取具有黏结剂包覆的砂粒。也可以采用机械混合与化学混合并用的方法，即不是单纯使用树脂进行机械混合，而是添加可以促使混合更加均匀的极少量的添加剂。实践表明，这种黏结剂包覆的粉末制备虽然较复杂，但覆膜膜薄且均匀，烧结效果较机械混合的粉末好。

2）工艺过程　SLS 工艺过程中比较关键的环节是送粉、铺粉、压粉、激光器启停及加减速控制。

① 送粉、铺粉、压粉　通常采用送粉器来实现送粉，采用辊子来实现铺粉及压粉。对于覆膜砂，由于粉末本身具有一定的粘度，这一工艺过程比干砂铺粉及压粉困难。在铺粉的过程中，辊子的平动可以实现送粉和铺粉。其逆向转动可以把多余粉末推开，不致挤在辊子下面。辊子在做纯滚动压粉时，粉末不会被推开而能被压实。这种"压滚"技术对粉末的紧实很有效，它可以使相对密度达到 40% 甚至更高。试验表明，辊子对粉末层的接触可以简化为线接触，在辊子下的材料承受压应力。这种压应力传到下面壳型的已烧结好的部分上时，很容易使强度较低的壳型产生裂纹。

② 激光器启停响应　采用连续式的 CO_2 激光器，打开激光时，激光功率经过一个过渡过程后才能达到设定值。但激光在关断时非常快，几乎没有延迟，也没有过渡过程。因为这种特殊的延迟过程的影响，对于覆膜砂材料采用不同功率、同一速度烧结时，发现其烧结形态是不同的（见图 6.16-36）。采用最大激光功率时，不同速度对熔宽的影响也不同（见图 6.16-37）。

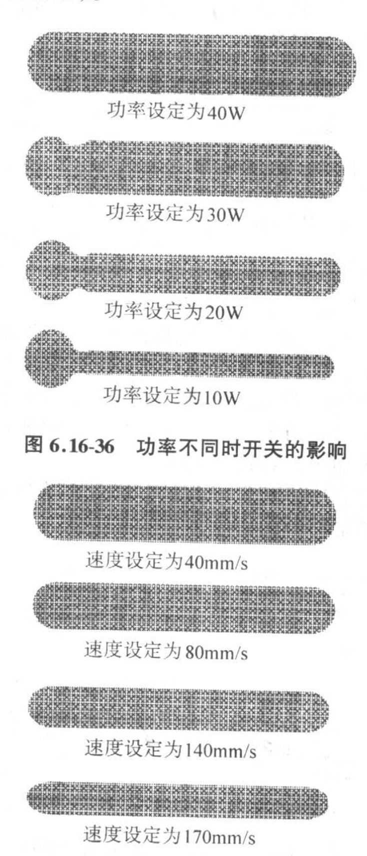


图 6.16-36　功率不同时开关的影响

图 6.16-37　功率最大时不同速度的影响

从图 6.16-36 和图 6.16-37 中可以看出，激光功率越大时，扫描熔宽越大；提高扫描速度，则可以使扫描熔宽变窄。在进行覆膜砂的 SLS 过程时，由于树脂黏结剂层受热易于熔化，激光功率必须选得较低，但在每次开激光时往往就会产生"火柴头"现象（见图 6.16-36 中功率设定为 10 W 的情况）。较好的解决方案是同时提高扫描速度和激光功率，一方面消除了因打开激光所造成的"火柴头"现象，另一方面也使熔宽变窄，利于精度的提高。

③ 加、减速过程的影响　设通过丝杠电动机对负载提供的推力为 F_1，阻力为 F_2，负载质量为 m，忽略其他影响，则负载的加速度 a_1 和减速度 a_2 分别为：

$$a_1 = F_1 / m$$

$$a_2 = F_2/m \tag{6.16-7}$$

显然，负载越大，加、减速度越小。由于扫描过程中存在加、减速过程，在激光烧结材料时烧结线的起始点和终点受热较多，亦会产生"火柴头"效应。假设激光功率稳定，则理想的烧结线和由于激光束的加、减速所造成的烧结效果如图 6.16-38 所示。因此，需要通过反复试验，确定最佳工艺参数，尽量减少启停及加、减速的影响。为此，还需要注意成形时功率－速度的实时匹配。如果能够做到理想的实时匹配，则激光在以不同速度进行烧结时将会得到一致的烧结效果，并消除"火柴头"现象。覆膜砂的激光烧结比金属、陶瓷等非覆膜砂烧结更易发生"火柴头"现象，激光启停响应和功率匹配问题更应充分注意。



(a) 理想的烧结线

"火柴头"
加速
匀速
减速

(b) 无激光功率匹配的烧结线

图 6.16-38　加、减速对覆膜砂烧结的影响

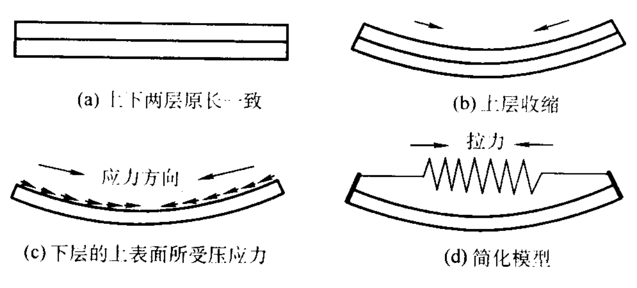
覆膜砂 SLS 工艺的参数很多，主要可分为两类（见表 6.16-16），其中影响显著的主要参数包括扫描速度、激光功率、粉末层厚、重叠系数。

表 6.16-16　SLS 参数一览表

材料参数	加工参数
材料组成，粒度分布，颗粒形态，表面张力，裂纹尺寸，密度，黏度，热容，热导率，传热系数，颗粒尺寸	扫描速度，激光功率，光斑尺寸，紧实率，重叠系数，粉末层厚，粉末床温

3）覆膜砂 SLS 工艺性能研究

① 覆膜砂的压实　压实的目的是为了获得树脂覆膜砂材料的紧实率 ρ 值。在进行 SLS 试验时，覆膜砂烧结后的翘曲现象是一个非常普遍的问题，如图 6.16-39 所示。材料烧结后翘曲的原因有两个：一个原因是由于树脂砂粒烧结后密度变大，体积缩小，导致表层收缩，产生翘曲；另一个原因则是材料的热胀冷缩特性导致的。因此，为减轻翘曲现象，应通过级配增加粉粒的密度。



(a) 上下两层原长一致　(b) 上层收缩
(c) 下层的上表面所受压应力　(d) 简化模型

图 6.16-39　覆膜砂烧结层翘曲机理

粉粒经紧实后可以提高其密度。覆膜砂经紧实后压结在一起，并具有较高的强度，这对于提高成形件的强度是有利的，但又不利于烧结成形。覆膜砂平铺在工作台上后，进行压实有利于减轻烧结时产生的翘曲现象。但并不是紧实率（或压缩量）越大越好。当压结强度接近于烧结后的强度时，很难取型，因此紧实率不宜过高，应取适当的值。粉粒的紧实率可以通过如图 6.16-40 的试验测得。

紧实率 ρ 为

$$\rho = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \tag{6.16-8}$$

式中，h_1 为压实前的粉末高度，mm；h_2 为压实后的粉末高度，mm。

覆膜砂粉粒应尽可能压实而又有较低的压结强度。通过

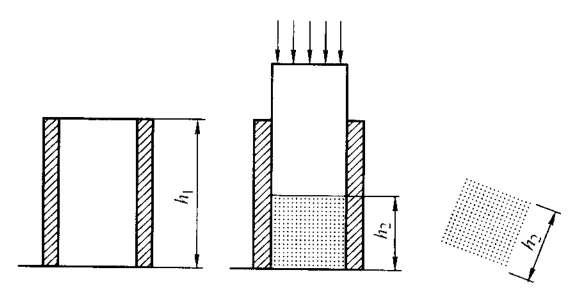


图 6.16-40　粉粒紧实率测定

此种方法很容易获得较为理想的紧实率 ρ 值。

② 一维烧结试验　对适宜 SLS 工艺的材料进行一维烧结试验的目的是为了了解材料的 SLS 工艺性能，获得其熔深 h 与熔宽 w。树脂覆膜砂属于低功率密度激光的 SLS 材料，其一维烧结试验比较重要。当激光以一定的参数扫过粉粒时，烧结线的截面如图 6.16-41 所示，其中 w 是烧结线宽（熔宽），h 是熔深。由于热扩散的影响，一般情况下 w 大于激光的焦斑直径。在不考虑材料本身的热效应时，可以找到移动热源在加工材料时的温度分布图。但在实际加工过程中，由于材料的物理性质（颗粒大小、粉末形态、粒度分布和粘结剂覆膜状况等）和化学性质的差异，应当通过试验确定 h 和 w。对于某种特定材料，功率密度与扫描速度的比值虽然可以看成一个非常重要的参数（呈线性关系），但由于散热等因素的影响，对于同样的加工效果，功率（或功率密度）与扫描速度的实际关系曲线如图 6.16-42 所示。图 6.16-42 中 P_0 的意义在于当激光功率小于该值时，即使激光一直停在某一点，也不能将该处的粉末烧结。当功率较大时，扫描速度与功率接近正比关系。

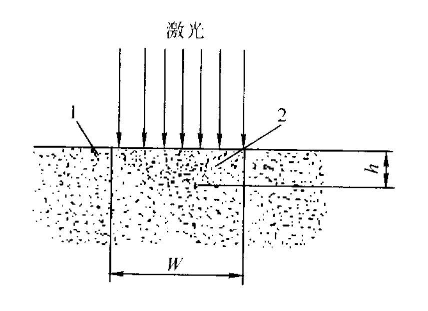


图 6.16-41　一维烧结线
1—未烧结粉粒；2—已烧结粉粒

③ 二维烧结试验　在 SLS 工艺中，面片是由许多烧结线组成的。二维烧结试验的主要目的是找出相邻烧结线之间



的重叠系数 ψ。烧结线连成面片的示意图如图 6.16-43 所示。

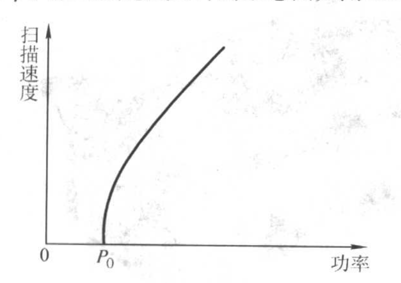


图 6.16-42　相同烧结效果下功率与速度的关系

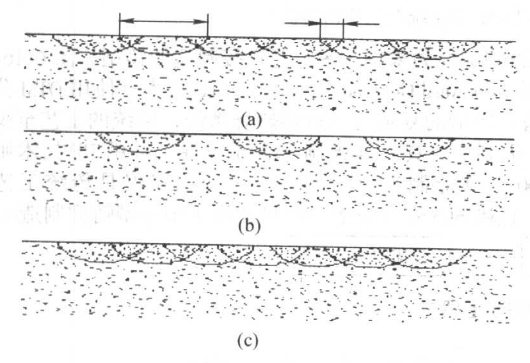


图 6.16-43　烧结线连成面片示意图

重叠系数 ψ 定义为重叠部分的宽度占熔宽的百分比：

$$\psi = \frac{D_w}{w} \tag{6.16-9}$$

式中 D_w 为重叠部分的宽度。ψ 很显然小于 1，它是一个较为重要的参数。图 6.16-43a 是比较合适的情况，图 6.16-43b 的两条烧结线没有连接，线与线之间不能连成面片，图 6.16-43c 表明了 ψ 过大的情况。ψ 过小会导致相邻两条烧结线之间连接不牢；ψ 过大时，虽然烧结线之间的连接变好，但成形效率则会降低，还会引起较大的翘曲，并会造成取型困难。

④ 立体烧结试验　对于粉粒激光成形，层与层之间的连结试验非常重要，这是由于覆膜砂的粉粒表面有一薄层粘结剂，在压实、烧结过程中，有可能造成压结而无法取型，即有利于粘结的因素和有利于取型的因素是矛盾的，因此必须通过立体造型试验找出适当的工艺参数。层厚 δ 是一个非常重要的参数。事实上 δ 既是决定 Z 向精度的重要指标，又是决定造型效率的关键因素。面片的立体粘结示意图如图 6.16-44 所示。由图 6.16-44 可知，很显然，δ 应当小于 h。在立体造型过程中，如 δ 值接近于 h 值时，层与层之间很容易剥离，甚至最终只能得到沿 Z 向离散的一系列面片。δ 值过小时，一方面造成成形效率的低下，另一方面会造成严重翘曲或很大的内应力。

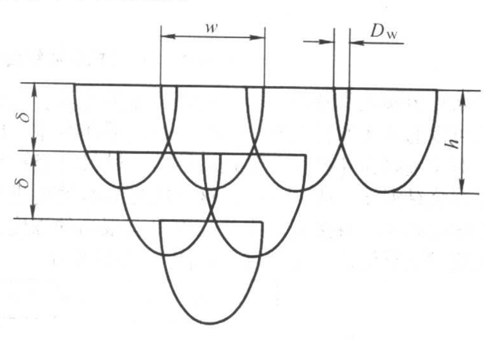


图 6.16-44　面片的立体粘结示意图

⑤ 壳型孔隙率　壳型是用于浇注的，因此壳型必须保持一定的透气性和孔隙率。但是，如果孔隙率过高，则会大大影响壳型的强度，在浇注时容易引起壳型破裂甚至溃散。好的覆膜砂 SLS 工艺在孔隙率与铸型强度两者之间取得平衡。覆膜砂 SLS 工艺所获得的壳型，其孔隙率值应当比一般的砂型铸造中的值稍高一些。

4）应用实例　德国 EOS 公司推出了专门用于砂粒激光烧结成形技术的设备——EOSINT S 750，EOS 公司把砂粒激光烧结成形工艺称为 DirectCast® 工艺，强调壳型和型芯同时成形。在图 6.16-45 所示的 DirectCast® 工艺流程中，第一步是在计算机中获得铸件及壳型的 CAD 三维模型，第二步是在 EOSINT S 设备上得到各部件的壳型和型芯，第三步是将它们进行组合形成铸模，最后是浇铸获得金属件。图 6.16-46 是使用 DirectCast® 工艺得到的壳型（右后）及铸件（左前）。

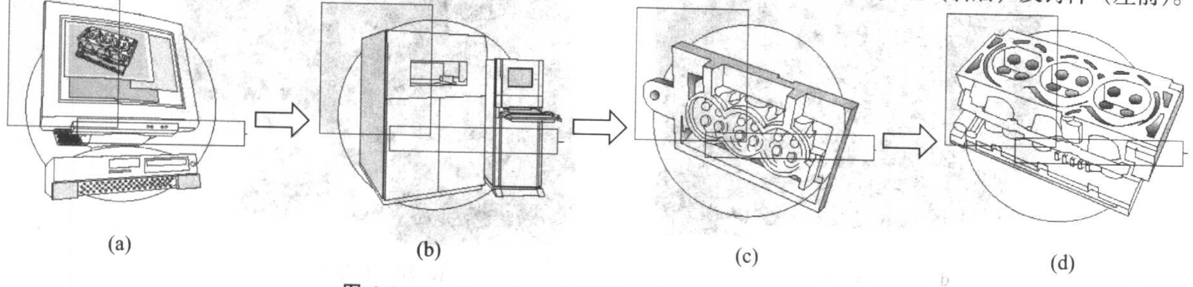


图 6.16-45　DirectCast® 工艺流程（www.eos _ gmbh.com）

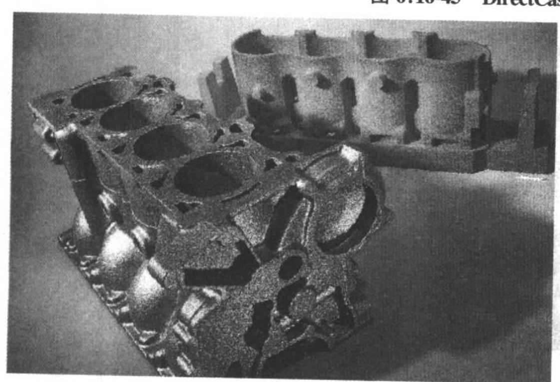


图 6.16-46　DirectCast® 工艺获得的壳型（右后）**及铸件**（左前）

图 6.16-47 是北京隆源自动成型系统有限公司采用覆膜砂 SLS 铸型制造技术获得的一组缸体的铝铸件。此类零件的制作周期平均约 2 ~ 3 周。由于铸造工艺与最终生产工艺极其相近，零件的尺寸精度和机械性能与最终产品零件具有很强的可比性。因此，快速砂型铸造的缸体缸盖可直接用于发动机的各种评价试验，如对气道进行流动分析，对水道进行冷却性能测试。

3.1.2　直接 SLS 壳型烧结

直接 SLS 壳型烧结工艺所采用的材料的粒度比覆膜砂小，一般是粉末或粉粒，有时也用细微粉末或微粉末。直接 SLS 壳型烧结是一种直接的 SLS 过程，用大功率激光器直接扫描被压实了的粉末平面，使之达到砂粉的烧结温度，得到致密度高的壳型。直接 SLS 壳型制造设备包括一个高温工作

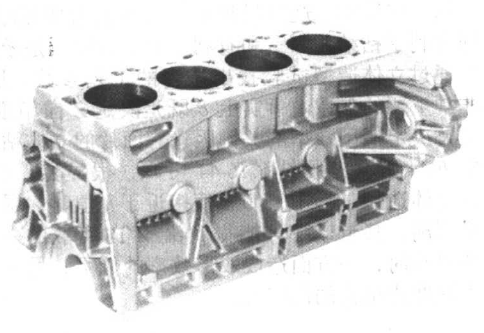
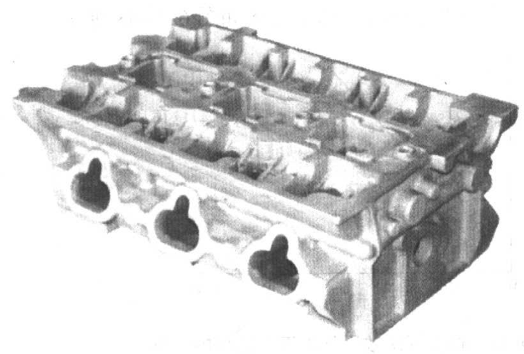



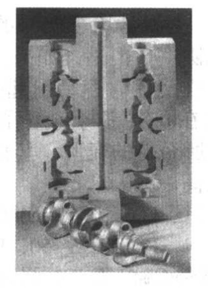
图 6.16-47　发动机缸体铝合金铸件（北京隆源自动成型系统有限公司提供）

室和用以熔化金属或陶瓷粉、砂粉的高功率激光器。高温工作室内通常可以通入还原性气氛、惰性气体或采用真空，以防材料氧化，对于金属粉末来说，激光烧结前，材料已经被加热到接近熔点或烧结温度。研究表明，这样能更为有效地进行烧结且材料的翘曲较小。直接制造出的壳型具有很高的强度，可以直接作为壳型进行浇铸。这种过程如图 6.16-48 所示。

图 6.16-49 为采用 SLS 工艺直接制造的铸型。图 6.16-49f 为美国 Woodward Governor 公司采用 SLS 技术（使用 DTM 公司的设备）制造的复杂的飞行器燃烧系统，传统的工艺至少需要 245 天制造模具，84 天制造金属零件，采用 RP 技术则只需要 60 天就能制造出金属零件，费用仅仅是传统工艺的 20%。直接 SLS 壳型烧结一般只适用于中小型铸型制造。

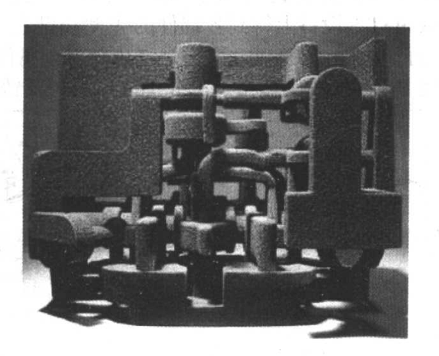
金属粉或砂粉 → 高功率激光烧结或熔结 → 金属零件或壳型

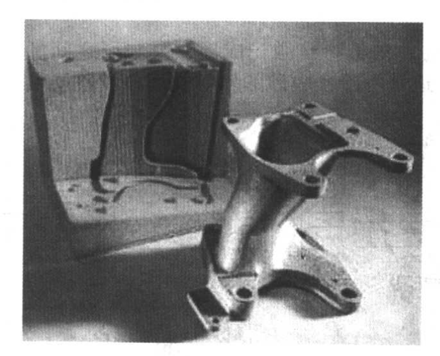
图 6.16-48　直接 SLS 壳型制造示意图


(a) 曲轴


(b) 缸体


(c) 叶轮


(d) 液压连接器


(e) 轿车操纵器

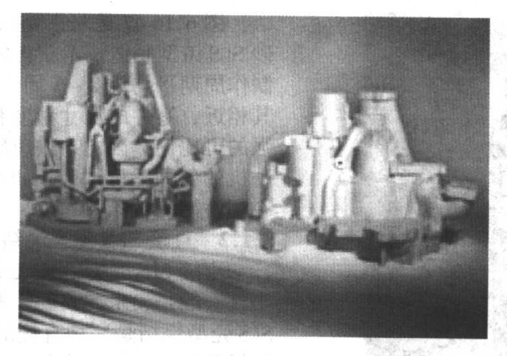

(f) 飞行器燃烧系统

图 6.16-49　直接 SLS 壳型烧结的壳型及铸件（T. Wohlers Reports 2001）



3.1.3 SLS 蜡型熔模铸型制造

采用 SLS 工艺烧制蜡粉或蜡与树脂的复合粉而得到蜡模的工艺称为 SLS 蜡型熔模铸型制造，它是直接 SLS 工艺与熔模铸造工艺相结合形成的工艺。

SLS 蜡型制造具有 RP 工艺的一切优点，即形状和结构复杂程度无限制，直接由 CAD 模型驱动而完成；SLS 蜡型的精度完全可以满足熔模铸造对蜡模的要求；由于无需专用的注蜡成形的模具，因而大大缩短了制作周期、降低蜡模制造的成本，在产品试制和中小批量生产的情况下此优势更为明显。SLS 蜡型熔模铸型制造是高柔性的制造技术，是适于个性化生产的制造技术。

在航空、航天以及军工产品零件中，精密铸件所占的比重很大，特点是品种多、形状复杂、生产批量小，传统的铸造方法周期长、成本高，给高性能产品的试制造成很大的困难。将 SLS 技术应用于模具制造工业，与模具技术相结合，其优点在于可将产品设计、模具设计和加工过程组合为一体，实现信息共享，对产品和模具结构同时作优化设计，使模具的制造时间大大缩短，制造成本大大降低，有利于产品市场竞争。同时，也为并行工程的应用创造了必要条件。

SLS 蜡型熔模铸型制造技术已被证明是解决小批量复杂零件制造的非常有效的手段。迄今为止，北京隆源自动成形系统有限公司用此技术成功地生产了包括叶轮、叶片、发动机转子、泵体、发动机缸体、缸盖等千余件复杂铸件。

图 6.16-50 为使用 SLS 技术为某摩托车厂制作的 250 型双缸摩托车汽缸头。这是一款新设计的发动机，用户需要 10 件样品进行发动机的模拟实验。该零件具有复杂的内部结构，传统机加工无法加工，只能采用铸造成形。整个过程需经过开模、制芯、组模、浇铸、喷砂和机加等工序，与实际生产过程相同。其中仅开模一项就需三个月时间。这对于小批量的样品制作无论在时间上还是成本上都是难以接受的。北京隆源自动成形系统有限公司采用激光选区烧结技术，以精铸熔模材料为成形材料，在 AFS 成形机上仅用 5 天即加工出该零件的 10 件铸造熔模，再经熔模铸造工艺，10 天后得到了铸造毛坯。经过必要的机加工，30 天即完成了此款发动机的试制。

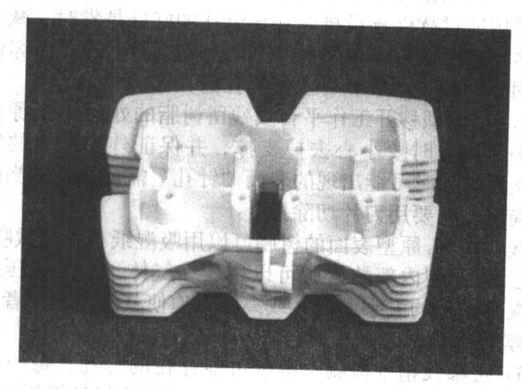


图 6.16-50 双缸摩托车汽缸头样件
（北京隆源自动成型系统有限公司提供）

图 6.16-51 是采用快速铸造方法生产的燃气发动机 S 段，零件直径 800 mm，高 410 mm，按传统金属铸件方法制造，模具制造周期约需半年，费用几十万。采用 SLS 蜡型熔模铸型制造技术，快速成形铸造熔模 7 天（分 6 段组合），拼装、组合、铸造 10 天，费用每件不超过 2 万（共 6 件）。图 6.16-52 为某新型坦克增压器的铸造熔模，仅用 5 天时间就完成了 37 件蜡模的生产，使整个试制任务比原计划提前了 3 个月。

图 6.16-53 是用快速精密铸造方法制造的铝合金进气管零件。从收到零件的三维 CAD 数据到毛坯完成仅 10 天时间，

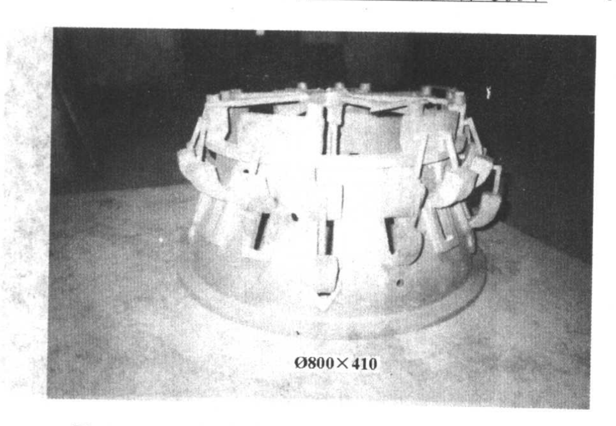


图 6.16-51 采用快速铸造技术生产的燃气发动机 S 段
（北京隆源自动成型系统有限公司提供）

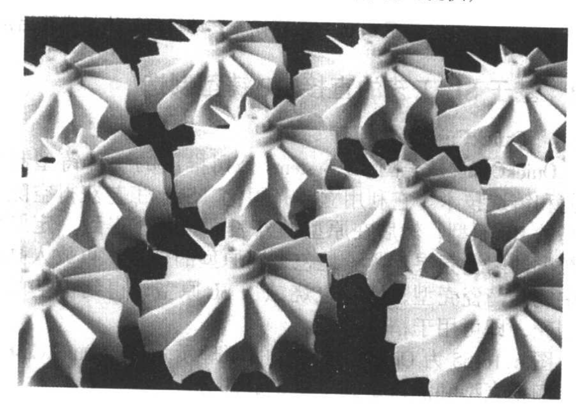


图 6.16-52 某新型坦克增压器的铸造熔模
（北京隆源自动成型系统有限公司提供）

其中零件熔模的快速制造 1 天，熔模铸造 7 天，其他后处理及检验 2 天。进气道是发动机极其重要的组成部分，由复杂的自由曲面构成，它对提高进气效率，改善燃烧过程有十分重要的影响。在发动机的设计过程中，需要对不同的进气道方案进行气道试验。传统的方法是加工出十几个或几十个截面的气道木模或石膏模，再翻制成砂模铸造出气道。对气道进行试验找出不足后，还要重新修改模型。如此反复，费时费力，而且精度难以保证。采用快速成形方法，可一次性地提供一组不同曲面的 CAD 数据，通过快速铸造，同时得到一组进气管零件。经过测试，得到一组不同气道结构的全面的数据，从而筛选出最佳的气道方案，这样大大加快了研制速度。

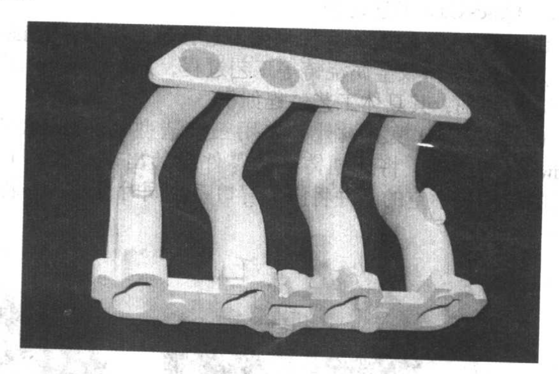
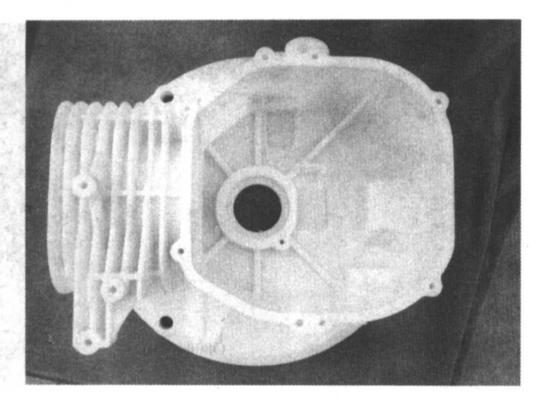
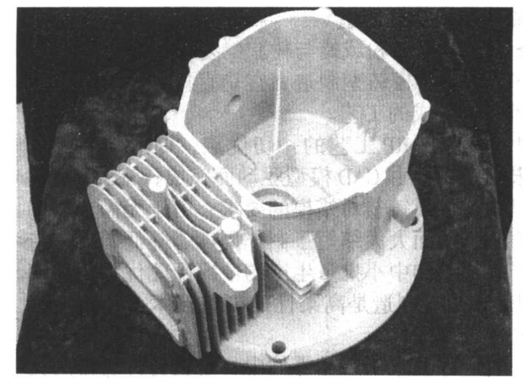


图 6.16-53 用快速精铸制作的铝合金进气管
（北京隆源自动成型系统有限公司提供）

图 6.16-54 是武汉滨湖机电技术产业有限公司制造的摩托车发动机气缸体蜡模及铝合金精密铸件，蜡模尺寸为 251.3 mm × 251.2 mm × 180.0 mm，制作时间为 10.5 h。



(a) 蜡模



(b) 铝合金精密铸件

图 6.16-54　摩托车发动机气缸体蜡模及铝合金精密铸件（武汉滨湖机电技术产业有限公司提供）

3.2　基于 SL 工艺的直接 RP 铸型制造

3.2.1　QuickCast 工艺原理

QuickCast™是美国 3D Systems 公司推出的一种铸型制造工艺和铸造技术。它利用立体光固化（SL）工艺获得空隙率很高的 RP 原型，然后在原型的外表面挂浆，得到一定厚度和粒度的陶瓷壳层，紧紧地包裹在原型的外面，再放入高温炉中烧结陶瓷壳型，同时也烧蚀了 SL 原型，得到中空的陶瓷型壳，即可用于精密铸造。

图 6.16-55 为 QuickCast 工艺的原理示意图，QuickCast 原型、陶瓷壳型和浇口是其主要组成部分。

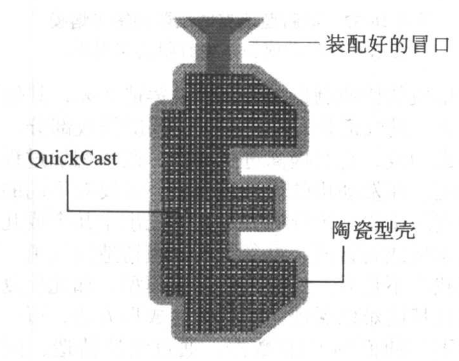


图 6.16-55　QuickCast 工艺原理图
（来自 www.solidconcepts.com）

3.2.2　QuickCast 工艺过程

由于 QuickCast 中的 SL 原型要经过挂浆、熔模（烧蚀 SL 原型）、安装浇口及金属浇铸等工艺过程，故与一般 SL 工艺有一定的区别，其具体工艺过程如下。

1）三维 CAD 模型设计　采用三维造型软件如 PRO/E、Solidworks 等软件，将计划铸造的零件设计出来，这种 CAD 模型的结构是中空的，并将浇、冒口系统同时设计上。若条件许可，可以对设计的零件进行铸造凝固模拟，优化零件与浇口、冒口的工艺设计。在设计过程中，将制造工艺中的材料收缩系数一并考虑在内，以便铸造出合格的精密铸件。设计出的三维 CAD 模型输出为 STL 文件。

2）SL 原型制作　物体 CAD 模型和相应支撑结构的 STL 文件经分层软件处理后送到成形机控制部分，然后驱动激光器和工作台升降及刮平等机构完成 SL 原型的制作，如图 6.16-56 所示。

图 6.16-57 为制作好的 SL 原型件。

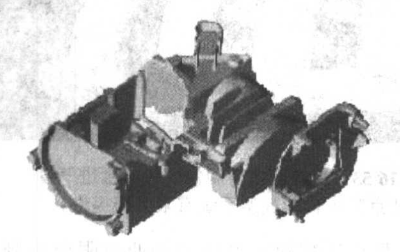
3）钻导流孔及排气口　在 QuickCast™1.0 工艺中，为了排放多余的、没有凝固的液态树脂，需要在原型表面钻或刺导流孔及排气口，然后通过物理或化学的方法去掉内部树脂。一般来说，比较平坦的区域适合钻孔，导流孔的直径大约在 $\phi 3.175 \sim 6.35$ mm，排气口的直径要小得多，约为 $\phi 0.762$ mm。但钻孔带来的问题就是操作者必须十分小心，否则就很有可能碰坏比较脆弱的还没有固化的区域，造成 SL 原型件的破坏。QuickCast™ 1.1 工艺中用户通过软件可以在呈现的所有平坦的外三角面片上随意选择排气孔的位置及直径，在内三角面片中布置导流孔的位置及直径。

采用通过软件预设排气和导流孔的好处是省时、减少浪费（多余的树脂流向液槽，可以继续使用）、不会损坏没有最后固化的脆弱区域和可以控制孔的大小。

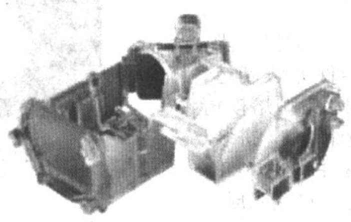
4）SL 原型移开工作平台及残留树脂的处理　SL 原型从工作平台移开时要小心去掉支撑，并保证外部结构的完整性，支撑移开时可能出现的表面“针孔”需要进行适当的修补，局部凸起要用刀片切除掉。

残留在 SL 原型表面的树脂可以用吸湿纸小心擦拭吸干，残留在 SL 原型内部的树脂可以用压缩气体（6 Pa 的压缩氮气，视原型件的大小而定）或离心机迫使其挤出，或者采用异丙醇试剂清洗。

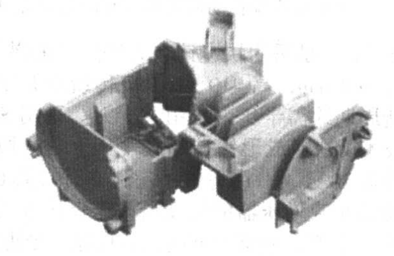
5）抗渗及精度检测　由于可能存在的针孔，每一个 SL 原型都必须进行抗渗检测试验，以免陶瓷挂浆时浆料进入到



(a) 三维CAD模型



(b) SL树脂原型



(c) 金属铸件

图 6.16-56　基于 SL 原型的精密铸造



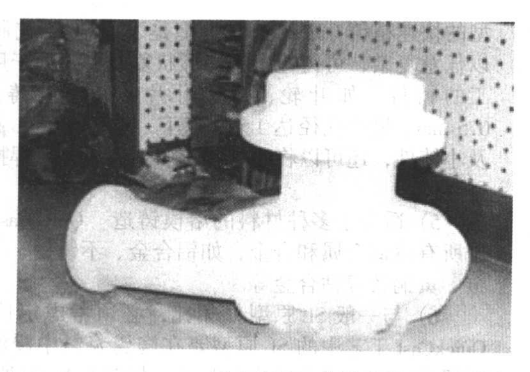
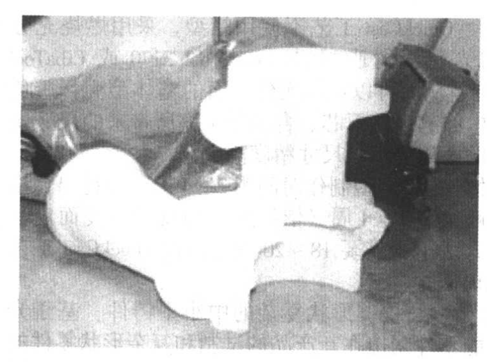



图 6.16-57　制作好的 SL 原型件及剖开件（来自 www.3d-cam.com）

原型内部，从而无法烧掉，影响零件的精度。由多个 SL 原型装配成的大型原型只应保留一个出口。

SL 原型的尺寸精度决定了最终零件的合格性，因而也必须进行必要的检测。图 6.16-58a 为抗渗检测实验过程，图 6.16-58b 为 SL 原型的尺寸检测图。

6）陶瓷挂浆　经过抗渗检测和尺寸检测合格的 SL 原型在陶瓷浆料中要经过反复浸泡以增加陶瓷壳抗裂强度。具体过程如下：首先在 SL 原型表面浸涂上耐火材料（浆料），并撒上一层砂粒（石英砂、刚玉砂、锆英砂等），再将已撒上砂粒的原型，在空气中干燥硬化（硅溶胶型壳），然后重新浸涂、撒砂干燥。这样重复数次，直到在原型表面结成厚度约为 8 ~ 10 mm 左右的型壳。

SLA 原型的陶瓷壳制作需要 7 到 9 次浸泡，比普通陶瓷壳多 1 到 2 次浸泡，陶瓷壳的厚度应该在 6 ~ 8 mm 之间。

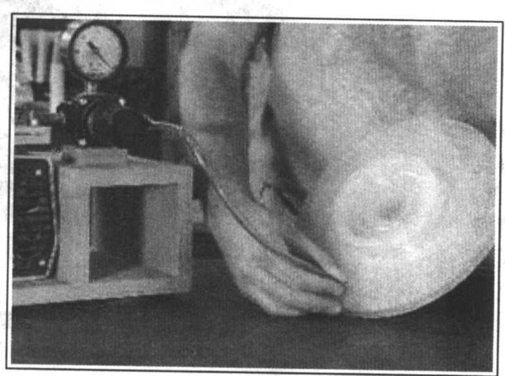
挂好浆的陶瓷壳先必须在蒸汽压力罐中熔化掉石蜡浇口(如果采用 QuickCast 则该工序可以不要)。蒸汽压力罐的工作参数为：温度 160℃、6 个大气压、7 ~ 10 min。

7）烧去 SL 原型　陶瓷壳硬化后需要将 SL 原型熔去，一般可以采用两种方法：将复合壳型放在 1000℃左右的高温炉中快速烧掉（高温闪烧法）或将复合壳型放在炉中慢慢升温到 1 000℃。第一种方法所需时间较短（2 h），但过高的温度梯度容易造成壳形开裂。由于 QuickCast 采用了特殊的中空制作 SL 原型工艺，残留灰分少，陶瓷壳型内部非常容易清理。

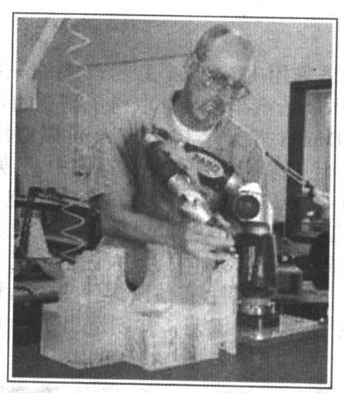
8）浇铸金属　将陶瓷壳预热到一定温度后将熔融金属浇入到壳型内部，冷却后陶瓷壳裂成碎片，得到金属铸件。切掉浇冒口，经过适当打磨、喷砂处理和探伤检测后，即可得到合格的金属铸件。

3.2.3　QuickCast 工艺特点

1）SL 原型为中空结构　制作 SL 原型的丙烯酸树脂和环氧型树脂的热膨胀系数比陶瓷的大，因此，在高压和烧结过程中，SL 模型要对较薄的陶瓷壳施加一定的张力，甚至有可能造成陶瓷壳的破坏。因此 QuickCast 中的 SL 原型内部为中空结构，并由早期的蜂窝状变成了空心立方结构，孔洞率高达 83%。这样做的好处是不仅可以减少烧结时对薄壳造成的应力冲击，而且 SL 原型烧掉时残留在空腔里的灰烬少，容易排空。图 6.16-59 为 SL 原型的中空结构示意图和制作的原型。

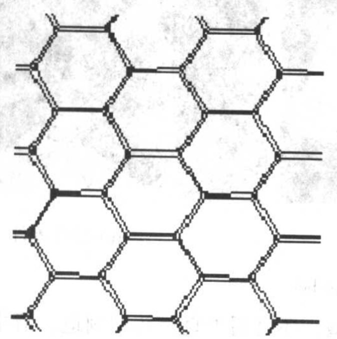


(a) 抗渗检测

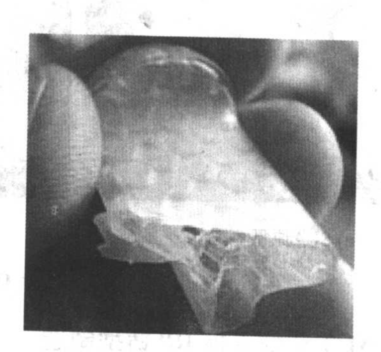


(b) 尺寸检测

图 6.16-58　SL 原型检测（来自 www.expresspattern.com）



(a) 中空结构示意图



(b) 制作的SL原型

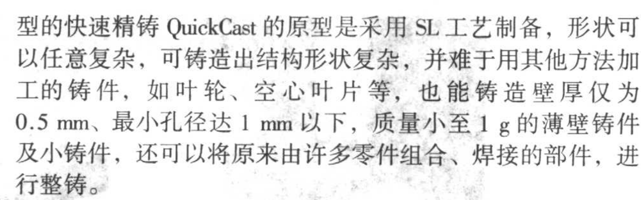
图 6.16-59　SL 原型（来自 www.3dsystems.com）



2）精度高 QuickCast 工艺不使用蜡型，采用燃烧充分且发气量小的光化固树脂材料（CibaTool 5170 或 CibaTool 5180）制作原型，从而可以获得无分型面的整体型壳，避免一般铸造方法中的起模、下芯、合型等工序所带来的尺寸误差、所获铸件的棱角清晰、尺寸精度高。

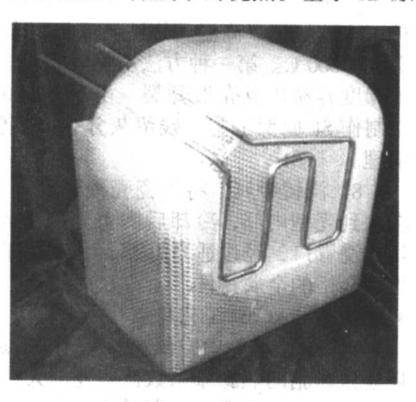
3）节省时间 SL 原型制作时间为 2～4 天，浇铸出合格的金属零件一般只需 1～4 周（依据零件的复杂程度而定）；而传统的铸造方法至少需要 18～20 周，因而 QuickCast 工艺能节省 80% 的时间。

4）适用于铸造结构、形状复杂的中小型铸件 基于光固化原型的功能零件制造在新产品的试制和复杂形状零件的单件、小批量生产中具有快速、低成本的优点。基于 RP 原型的快速精铸 QuickCast 的原型是采用 SL 工艺制备，形状可以任意复杂，可铸造出结构形状复杂，并难于用其他方法加工的铸件，如叶轮、空心叶片等，也能铸造壁厚仅为 0.5 mm、最小孔径达 1 mm 以下，质量小至 1 g 的薄壁铸件及小铸件，还可以将原来由许多零件组合、焊接的部件，进行整铸。



5）适合于多种材料的熔模铸造 QuickCast 工艺能适应于所有铸造金属和合金，如铝合金、不锈钢、工具钢、镁合金、黄铜及镍钴合金等。

6）与一般 SL 原型件相比，必须考虑定位问题 由于 QuickCast 工艺中的 SL 原型要在陶瓷浆料中浸泡，因而必须设置或安装一提起或定位装置，如图 6.16-60 所示。



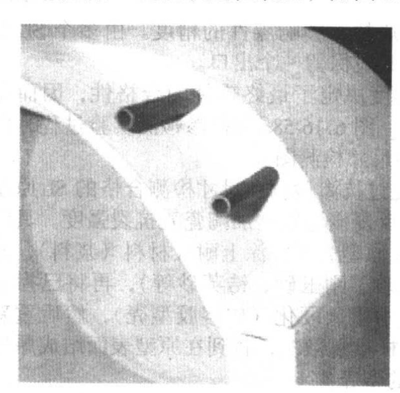


图 6.16-60 QuickCast 工艺中 SL 原型的定位装置（来自 www.moellerdesign.com）

7）产品合格率及单件价格 QuickCast 的 SL 原型制作合格率为 80%，浸泡阶段的产品合格率为 95%，烧掉 SL 原型制作陶瓷壳阶段的合格率为 99%。该工艺虽然属于“一对一”（一个原型对应一金属铸件），但在单件小批量生长中，与传统制造工艺相比，仍可降低初期模具费用、提高铸件精度，在价格上具有一定的优势。

3.2.4 应用实例

福特汽车公司是采用 QuickCast 工艺较多的一家用户，他们在利用用该技术制造汽车模具上取得了满意的效果，其工程技术人员 Karl Denton 指出：“QuickCast 可以应用在福特汽车公司设计的适合注塑模生产的大量零件中。”美国得克萨州仪器公司采用 QuickCast 技术成功的浇注出电子托盘、机架、印刷配线板复杂零件，在生产过程中，发现这种精密铸造技术无论是从成本还是从时间均大大优于传统的熔模铸造。据不完全统计，现在世界上有数以百计的公司和研究机构在采用基于 SL 的 QuickCast 工艺，并创造出了巨大的经济价值。

图 6.16-61 为采用 QuickCast 工艺制造出的不锈钢零件，图 6.16-62 为采用 QuickCast 工艺制造出的铝合金零件，这些铸造出的零件均具有相当高的精度。

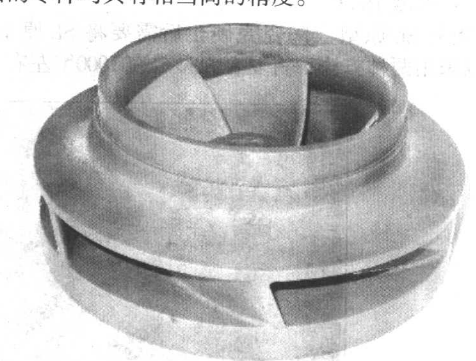
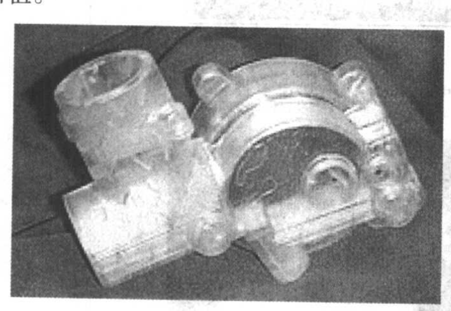
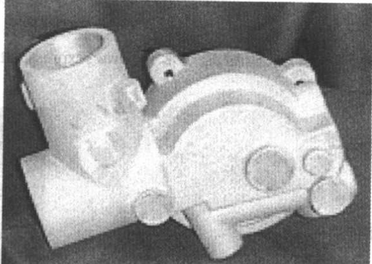


图 6.16-61 采用 QuickCast 工艺熔模铸造出的不锈钢零件（来自 www.selecteng.com）

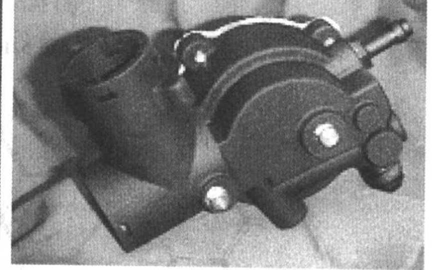




(a) SLA原型



(b) 铝合金铸件



(c) 最终零件

图 6.16-62 QuickCast 铸造（来自 www.techok.com）

3.3 基于 LOM 工艺的直接 RP 铸型制造

LOM 工艺不仅可以其 LOM 原型替代铸造木模完成翻砂而获得铸型，还可用于直接铸型制造。清华大学激光快速成形中心与该校精密铸造实验室合作，进行基于 LOM 工艺的直接铸型制造工艺探索，其工艺流程如图 6.16-63 所示。

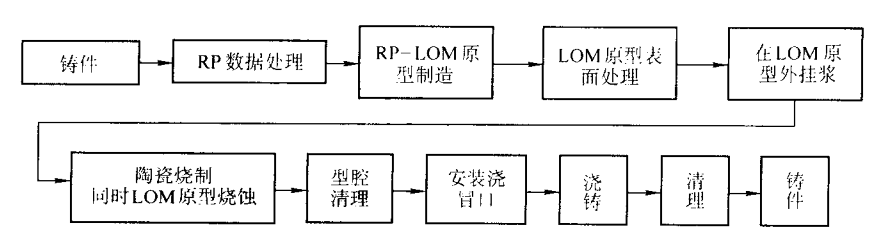


图6.16-63 基于LOM工艺的直接铸型制造

将LOM原型当作“熔模”的模型与一般LOM原型相比有如下特点值得注意：

1）LOM原型应高温烧蚀成为易于清除的灰粉状态；而不能结焦结块；这就要求特殊的纸质（或其他材料）箔材和粘结树脂。

2）LOM原型的设计，应在保证一定强度前提下，尽量提高空隙率。

3）LOM原型的设计应考虑挂浆时的悬吊或支承结构，以利于挂浆工序的实施。

4 结语

RP与铸造技术相结合衍生出的快速铸造技术，其工艺特征具有简捷、准确、可靠和延展性等特性，可有效地应用于发动机等复杂结构件设计开发阶段中样机的快速制造；适合单件、小批量试制和生产的特点，可迅速响应市场和提供小批量产品进行检测和试验，有助于保证产品开发速度；其成形工艺过程具有可控性，可在设计开发阶段低成本地即时修改，以便检验设计或提供装配模型，有助于提高产品的开发质量；其原材料的多元性，为产品开发阶段提供了不同的工艺组合。

编写：杨伟东（河北工业大学）

第 17 章　激光引导直写技术

1　概述

近年来，基于离散-堆积成形的快速制造技术的应用出现了几个新的研究热点：内嵌微传感器的零件制造，电子元器件封装及 MEMS 微制造和组织工程领域的细胞载体支架制造。这些新应用领域所制造的器件具有微米量级特征尺寸的内结构，并且包含多种材料成份与分布。有别于传统的以层片离散为基础的快速原型制造，此类器件的制造突出强调工艺对单个材料单元进行自由操作的能力，在新的信息处理和堆积控制手段的帮助下，将材料单元在三维空间位置上进行定位、组装与粘接。目前主流的快速制造工艺大多将零件的形状信息离散为二维的层片进行操作，强调对层片轮廓的控制，而对非均质材料成分和精细内结构的控制能力有限，因此开发新的实现离散-堆积过程的使能方法是快速制造技术发展的一个重要瓶颈。

现代材料直写技术的发展恰好为此提供了良好的技术基础。它采用微机械手段或者高能束，在计算机的控制下对多种材料在微米尺度下进行个别操作和局部组织，形成平面物理层片和结构。这类技术可对数微米及以下尺度的材料微粒或聚合团进行操作，实现微米级的平面定位精度，通过材料受控有序沉积实现二维层片结构的制造，并且可以控制层面内的材料成分变化。目前主要的直写技术有激光引导直写技术 LGDW、基材辅助脉冲激光蒸发直写技术 MAPLE DW、微笔（micropen）和喷墨打印（ink jet）技术、电子束（e-beam）等等。这类方法的特点是可控性强，工艺对材料的依赖性小，可对多种材料进行操作，具有非常大的柔性，不必依赖于大规模加工过程生产线，因此不但在微加工领域得到了广泛的应用，而且作为实验操作技术在一些交叉领域，尤其是生物工程领域引起了重视。与快速制造技术一样，这类技术同样以材料的添加和沉积操作为基础，与离散-堆积成形的制造思想是一致的，因此可以通过对这些直写技术的改造，配合快速制造的数据处理和控制手段，将两者集成为一类新的快速制造技术，用于上述特殊器件的制造。当前，以微喷射方法为主的直写技术已经在一些快速制造系统中有了初步应用。

其中基于光压的直写技术具有尤其重要的意义。20 世纪 70 年代贝尔实验室的 Arthur Ashkin 提出了光力的概念，并将其用于微米尺寸粒子的捕获和操纵。由于光力具有非接触的特点，可用来操作活的生物粒子，如细胞、病毒、蛋白质片断等，具有特殊的意义，从而激光又一个重要的效应——力效应（或称机械效应）被广泛研究并以光镊的形式实现了商品化。光镊技术的重要目标之一是单个微粒的操纵。近年来有人提出可以使用光力和光压来引导微粒进行输运并在确定空间位置进行定位、排列或堆积，进而构造二维或者三维的微结构，这样就有可能利用光力进行微制造，成为激光在制造领域应用的新方向。

本章介绍利用光力和光压来引导材料进行微制造的基本原理和研究进展。

2　光力原理

光力来源于电磁波与粒子相互作用，即散射现象。对于尺寸远大于光波波长的粒子，散射中主要发生折射与反射，衍射分量不显著，因而可用几何光学来解释；反之，对于尺寸远小于波长的粒子，折射和反射分量可忽略不计，主要考虑衍射现象，一般在瑞利体系中将问题简化为均匀电场中各向同性绝缘球体的静电作用来处理。在本文所指的激光引导直写系统中，粒子尺度大致在微米量级，相当于或大于光波波长，部分可用几何光学体系来分析，而比较精确的计算需用米氏理论来进行。

2.1　光力的几何光学解释

对于光学衍射限之上的透明球形材料微粒，可在几何光学体系中分析光束与粒子的相互作用。

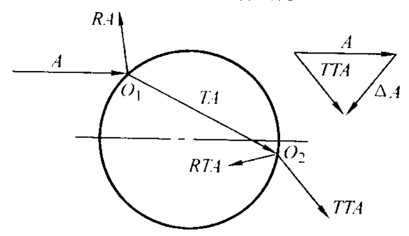


图 6.17-1　单光线与粒子的作用

考察光束中的单根光线与粒子的作用，如图 6.17-1，光线 A 入射到球形粒子边界 O_1 发生反射 RA 和折射 TA；折射部分 TA 在粒子中传播至边界 O_2 发生第二次反射 RTA 与折射 TTA。对于透光性比较好的粒子，可以忽略折射光线 TTA 以外的各分量以及它们跟粒子的进一步作用，这样光线 A 穿过粒子以后成为光线 TTA，其方向和大小都发生了改变 ΔA。

这个改变意味着光线中的光子受到粒子小球施加的作用，反之粒子必然亦受光子的冲量，方向与 ΔA 相反。

如图 6.17-2，考察关于小球轴对称的两条入射光线 A 和 B。由于光线 A 和 B 的的作用，粒子分别受力 F_A 和 F_B；若光场中光强分布不均匀，假设光线 B 强度大于光线 A，则受 B 作用引起的光力 F_B 大于由 A 引起的光力 F_A，因此 F_A 和 F_B 的合力在竖直方向向下，即指向光强比较大的地方。

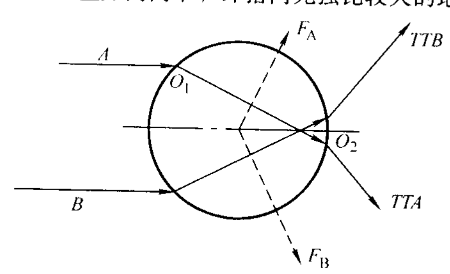


图 6.17-2　有光强梯度的光场中光线与粒子的作用

由球的对称性，如上成对分析入射到球面上的所有光线，可知小球所受的总的光力合力在光束横截面上的分量（光场梯度力）总是指向光强大的地方。高斯光束在光束横截面上光强呈钟形分布，光强最大处位于光轴上，因此高斯光束中的粒子总是受到指向光轴的光场梯度力作用。

忽略光线从小球出射时的二次反射，可以写出小球在单根光线作用下所受的光力表达式，对投射到小球上所有光线施加的光力求和即可得到小球所受的总光力（包括光场梯度力和光压力两个分量），但此计算过程比较复杂。

值得注意的是，图 6.17-2 的两条光线来自近似平行的光束，因此两个光力的合力在水平方向指向光束传播方向。若光束聚焦比较强烈，光线在粒子中的传播路径在球心左



边，这样光力合力的水平分量将向左，即与光束传播方向相反。在这种情况下，粒子左边的光强比粒子球心所在处要大，粒子受到指向光强最大处的光场梯度力，当此梯度力足够抵消沿光束传播方向的光压力时，就形成了光镊对粒子的夹持。因此利用强烈聚焦的光束，光镊可在光轴径向和轴向均实现粒子的捕限。而对于激光引导输运，仅仅需要光轴径向的捕限作用，而在轴向则希望光力能沿光束传播方向驱动粒子输运，因此虽然也使用透镜聚焦光束以集中能量，但同时也使用低 NA 数的光学变换系统，以获得以近似平面波传播的弱聚焦光束进行引导操作。

2.2 光压力的估算

光线在粒子表面发生反射，光力动量发生改变，据此推导高斯光束中微球所受的光压力。光子具有动量

$$p_0 = \frac{h\nu}{c} \tag{6.17-1}$$

和能量

$$\varepsilon_0 = h\nu \tag{6.17-2}$$

当光束垂直入射到物体表面发生镜面反射时，单个光子的动量改变为

$$\delta p = 2p_0 = \frac{2h\nu}{c} \tag{6.17-3}$$

设小球表面实际受到的辐照功率为 P_i，则单位时间投射到小球表面的光子数量

$$\frac{dn}{dt} = \frac{P_i}{\varepsilon_0} = \frac{P_i}{h\nu} \tag{6.17-4}$$

由此可得单位时间内投射到小球表面的光子总动量改变为

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \frac{dn}{dt} \times \delta p = \frac{2P_i}{c} \tag{6.17-5}$$

因此粒子小球所受光束的反作用力大小为

$$F_{mirr} = \frac{d\Delta p}{dt} = \frac{2P_i}{c} \tag{6.17-6}$$

假设光束在微粒小球表面上的有效反射系数为 q，则小球所受的光压力大小

$$F_{scatter} = \frac{2qP_i}{c} \tag{6.17-7}$$

在图 6.17-3 所示柱坐标系中，若小球半径 r_p 远小于所在位置光斑半径 $\omega(z)$，则可假设小球表面各处光强相等且为小球球心处光强，于是小球表面实际受到的辐照功率为

$$P_i = \left[\frac{I_P S_P}{\int I(r)dS(r)}\right] P_0 = \frac{e^{-2r^2/\omega^2(z)}\pi r_p^2}{\int_0^{+\infty} e^{-2r^2/\omega^2(z)}2\pi r dr} P_0 = \frac{2r_p^2}{\omega^2(z)} e^{-2r^2/\omega^2(z)} P_0 \tag{6.17-8}$$

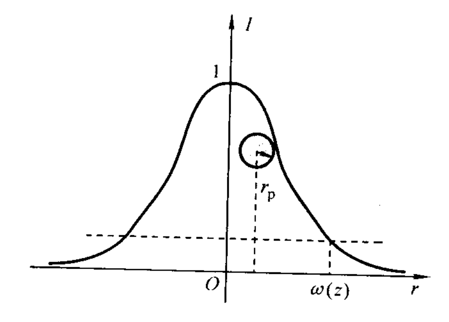


图 6.17-3 高斯光场中的球形微粒

式中，I_p 为微粒球心处的光强；S_p 为球的横截面积。由此，位于高斯光束中距离焦点径向坐标为 r，轴向坐标为 z 处的粒子所受的光压力大小为

$$F_{scatter}(r, z) = \frac{2qP_i}{c} = \frac{4qr_p^2}{c\omega^2(z)} e^{-2r^2/\omega^2(z)} P_0 \tag{6.17-9}$$

当粒子在光轴上进行输运时，粒子受到的光压力为

$$F_{scatter}(0, z) = \frac{4qr_p^2}{c\omega(z)^2} P_0 \tag{6.17-10}$$

这种光压力的估算方法将粒子接收光束辐照的表面等效为一个圆面，仅仅考虑光束在此面上的反射，忽略了粒子表面上各处光强的差异，而光强差异恰恰是前面所述光场梯度力的来源，因此这种使用有效辐照面积来估算光压力的方法不能用来计算光场梯度力的大小。

此估算方法假设粒子尺寸比其所处位置的光斑尺寸小许多，因此实际使用中具有较大的局限性和误差，然而由于表达式比较简洁，与各参数的数学关系很明确，因此在进行定性分析时具有重要指导意义。

2.3 基于 GLMT 的光力计算方法

比较精确的计算粒子在高斯光束中所受的光场梯度力和光压力可由电磁波的散射问题中对平面波与均匀球形粒子的相互作用的研究结论中得到，G. Gouesbet 等根据 Davis 发展的高斯波束的一阶近似，利用 Bromwich 公式深入研究了波束对均匀球的远区散射，将洛伦兹 - 米氏理论（LMT, Lorenz Mie Theory）推广为广义米氏理论（GLMT, Generalized Lorenz Mie Theory）。使用 GLMT 可以计算任何尺度粒子对高斯光束的散射问题，其中也包含了光束作用于散射粒子的辐射压问题，这就是粒子所受的光力，基本的计算公式为

$$\boldsymbol{F}_{optical}(\boldsymbol{r}) = \left(\frac{n_m}{c}\right)\frac{2P_0}{\pi\omega_0^2}\left[\hat{x}C_{pr,x}(\boldsymbol{r}) + \hat{y}C_{pr,y}(\boldsymbol{r}) + \hat{z}C_{pr,z}(\boldsymbol{r})\right] \tag{6.17-11}$$

式中，$C_{pr,x}$，$C_{pr,y}$ 和 $C_{pr,z}$ 分别是辐射压在三个坐标轴上的截面分量。向量坐标系以光束焦点为原点，光束传播方向为 z 轴正向。坐标系如图 6.17-4 所示，力的方向与轴正向相同时为正。

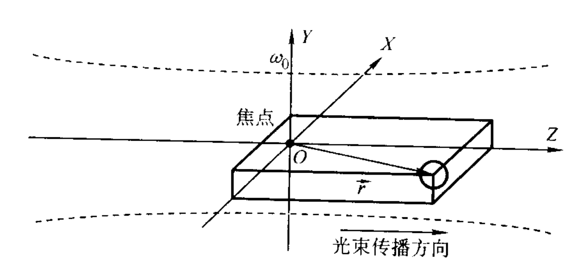


图 6.17-4 计算用的笛卡儿坐标系

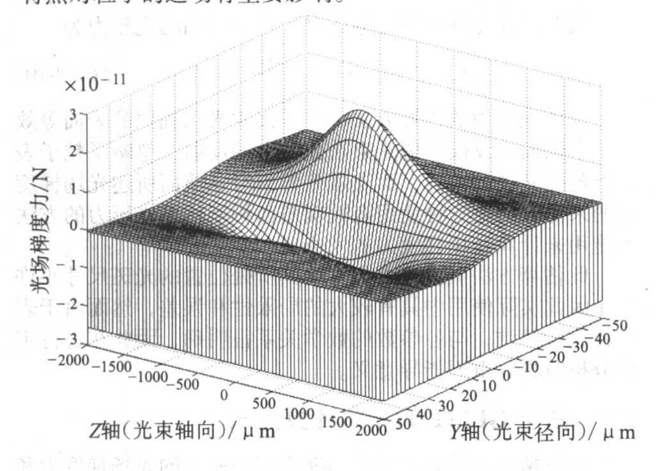
根据 G. Gouesbet 的数值计算方法可以编写相应的光力计算程序，考察微粒在聚焦光束中不同位置的光力，用于光力（光压）应用系统的设计。

$$\boldsymbol{F}_{optical}(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{G}_{LMT}(\boldsymbol{r}) \tag{6.17-12}$$

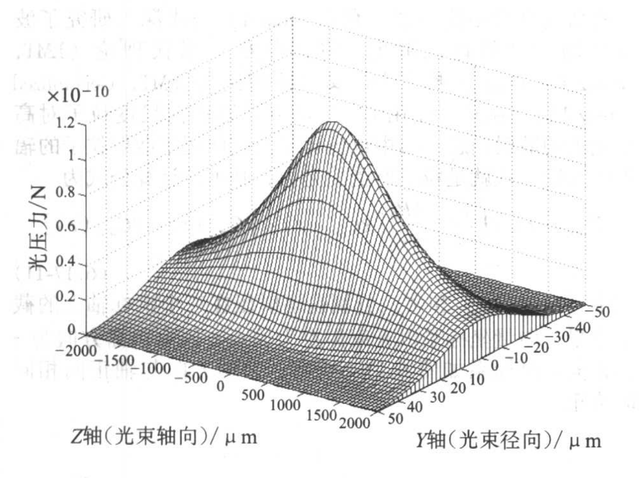
通过估算可以得到，功率 $P = 1$ W、波长 $\lambda = 0.514\ 5\ \mu m$ 的连续氩激光，入射到半径约等于激光波长，密度等于水的电介质微粒时，若有效反射率为 10%，则光压大约为 660 pN，小球受到的加速度为 $1.2 \times 10^6\ m/s^2$，大约是重力加速度的 10 万倍，相应的实验测得水中悬浮的小球速度为 $(26 \pm 5)\ \mu m/s$，对于微米或亚微米尺度的粒子，这个数量级的作用力和运动速度具有重要的意义。

利用 GLMT 方法可以求得光力的平面分布如图 6.17-5 所示。图 6.17-5a 显示光场梯度力在 $Y - Z$ 平面上的分布，轴向焦平面最大，两边逐渐减小，与光强分布形式一致；在径向表现为近似弹簧振子，与光强的分布形式和粒子的离轴距

离有关。图 6.17-5b 显示光压力在平面上的分布，在径向与轴向均为钟型分布，由前面的估算可知径向呈高斯分布，轴向呈洛伦兹分布，与光强的分布形式一致。光力的这种分布特点对粒子的运动有重要影响。



(a) 光场梯度力的分布



(b) 光压力的分布

图 6.17-5 光力在光场中的分布

3 应用光力的制造技术

研究人员利用激光的光场梯度力和光压构造了三维光阱，开发了对活生物粒子进行捕获和操纵的光镊技术，光镊与光刀结合在一起成为生物学基础研究的一种重要手段并取得商品化。光镊技术的相关研究在许多文献中已有广泛的总结。

可以设想，利用光压对微粒材料的操纵能力，可以用装配的方法来制造具有精细复杂结构的实体。这方面的研究报道近年来已经逐渐增多，出现了一些激动人心的成果。实现这种装配的技术大致包括三种：首先是直接借助商品化光镊的光压和光力控制单个材料质点，从而进行组装制造；其次是在光镊基础上发展出来的激光引导直写技术 LGDW；第三种方法则利用脉冲激光的光压将附着在“色带”上的材料质点“打印”到基底上实现微结构的制造，称为基材辅助脉冲激光蒸发直写技术 MAPLE DW。

直接用光镊来组装细胞“盖房子”的方法，如 2000 年哈佛大学直接使用光镊搬运单个细胞，将活细胞“装”成简单的三维形状体，目前尚停留在生物学基础研究领域的实验水平。而 LGDW 和 MAPLE DW 两种方法由于采用了“材料直写”的思路从而能对材料微粒进行大吞吐量的操作，真正体现了制造的观点。本节简单介绍这两种技术的原理和研究进展。

3.1 激光引导直写技术 LGDW

激光引导直写技术由美国密歇根理工大学的 M.J.Renn 等首先提出。他注意到在光镊技术中，为了捕陷粒子，一般使用大孔径的透镜来造成很大的光强梯度，以此产生足够大的梯度力来抵消粒子所受的辐射压力、重力及其他因素造成的力，比如流体的浮力、扰动等，这样实际操作区域仅限于聚焦光束的焦点附近很小范围，输运和直写粒子的过程极其冗长低效。为了实现多个粒子的连续输运，他提出改用低 NA 数值的透镜来聚焦，一方面光强梯度把粒子捕获在光束轴心，另一方面光压把粒子在光轴上向前推进。图 6.17-6 显示了激光引导直写的原理。数百毫瓦功率的激光束被透镜聚焦（孔径数值一般小于 0.1）后耦合进入空心光纤，悬浮于粒子源腔内的微粒在聚焦光场内同时受到指向光轴轴心的光场梯度力和沿光束传播方向的光压力，它们被捕获在光轴上，在光束的引导下通过空心光纤输运到底板上沉积，当底板受控运动时即可得到需要的图形。对于大部分粒子，在输运的同时因光束加热发生熔融化，在底板上沉积的时候发生粘接，从而堆积形成结构。空心光纤不但能帮助粒子流抵抗流体的对流和扰动，而且还会降低激光在媒质中的衰减，增大输运距离。

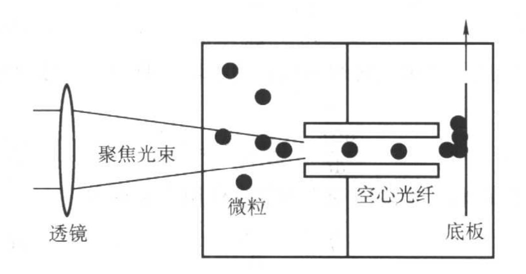
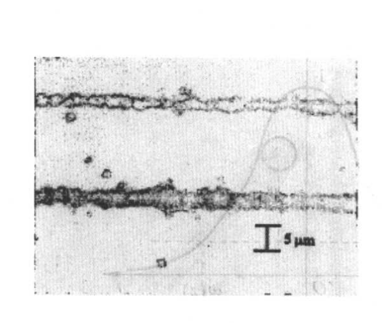


图 6.17-6 激光引导直写原理

实验表明不同介质环境中多种材料的粒子均可被用于这种方法，如液体中悬浮直写的有 SiO_2、聚苯乙烯、Ge、Si、Au、Al/AlO_2，气体中的有 NaCl、KI、SiO_2、CdS、Au 等材料，所使用的基底材料包括玻璃、塑料和半导体等等。图 6.17-7 分别是 M.J.Renn 完成的氯化钠粒子在水中和硝酸银粒子在大气中的沉积实验结果，其中两种粒子的直径均为 1 μm，右图硝酸银梯子的线宽为 10 μm，可见这种直写方法具有很强的构造微米尺度特征的加工能力。另外，对比这两



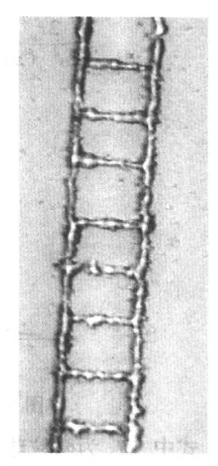


图 6.17-7 激光引导直写结果实例（来自 T.Wholers reports 2004）



个实验还能看出，环境介质的不同对沉积速度的影响很大，氯化钠在水中的沉积速率是每秒一百个左右，而大气环境中的硝酸银则超过一万个，大致可以认为介质的折射率和黏度两个性质是最主要的影响因素。

除此以外，如果采用合适的激光波长和功率，激光引导直写技术还可以对一些活的生物粒子进行操作，比如活细胞、病毒、蛋白质片段等。明尼苏达大学的 D.J.Odde 首先进行了这种实验，使用 800 nm/450 mW 的单横模激光将直径 9 μm 的活的小鸡胚胎脊髓神经细胞通过 7 mm 的空心光纤沉积到玻璃基底上，沉积的细胞成活并长出突触。

国际上从事这项研究的还有日本大阪大学，美国克莱姆森大学和英国巴斯大学，国内清华大学也将此技术与堆积制造原理相结合，已取得初步实验结果。

3.2 MAPLE DW 技术

MAPLE DW 技术由美国海军研究实验室（Naval Research Laboratory）的 D.B.Chrisey 提出，结合了激光诱导传输 LIFT (laser-induced forward transfer) 与基材辅助脉冲激光蒸发 MAPLE DW 两种技术。LIFT 是表面工程领域的一种新技术，利用激光的光压将透明支持物上面附着的材料输运到距离很近的物体表面；MAPLE DW 则利用脉冲准分子激光照射低温下固态的溶有有机分子材料的挥发性溶剂使其挥发，溶剂中的有机溶质沉积在基底上，工作原理如图 6.17-8 所示。

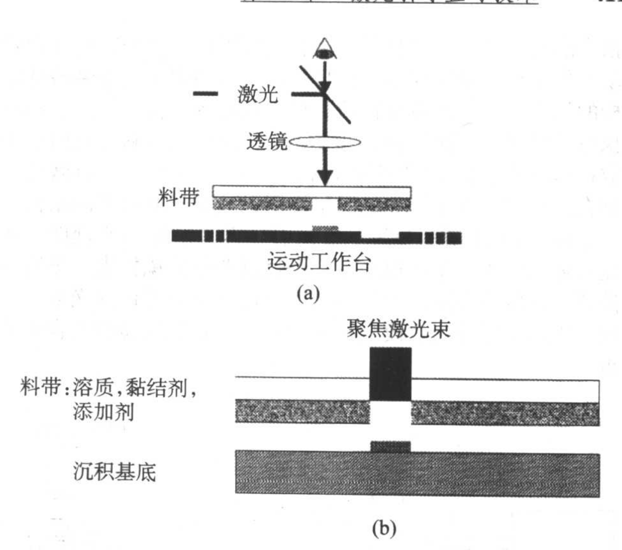
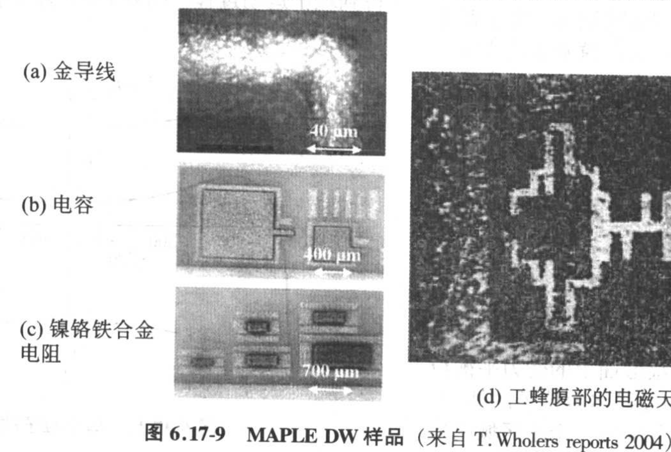


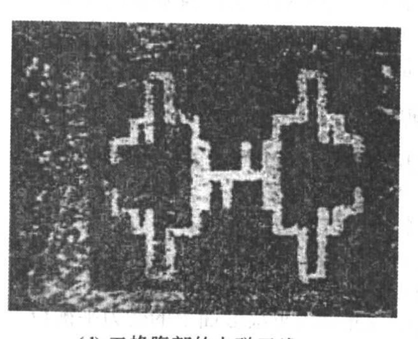
图 6.17-8 MAPLE DW 原理

需要沉积的材料与添加剂溶解在挥发性溶剂中，溶液在低温下固化并涂敷在透明带状材料上面制成连续的料带置于沉积基底的上面，脉冲激光经过聚焦照射到料带上，溶剂挥发，有机溶质释放出来（MAPLE 工作机制），有机溶质在激光光压的作用下沉积到基底表面（LIFT 工作机制）。料带不断送进，基底受控运动时即可获得任意的二维或准三维微结构，整个工作工程与针式打印机打印图案非常类似。这种工艺可在室温空气环境下进行，最直接的应用是在平面或非平面基底上制作有源或无源的电路元件原型，加工精度可达到 10 μm 甚至更高。图 6.17-9a、b、c 是采用这种方法制作的一些电路元件样品。

由于这种直写沉积过程不需要苛刻的环境条件，可以方便的沉积于多种材料的基底上，值得一提的是可以直接在生物活体上面进行材料的沉积。图 6.17-9d 显示的是采用这种技术在工蜂腹部上制作的一个电磁天线，为利用昆虫来进行危险地区的毒气检测等工作开辟了新的道路。

MAPLE DW 方法巧妙地将最新的直写技术与快速原型开发方法相结合，体现了当前光压应用于微制造领域的较高水平。加州大学伯克利分校的研究人员也在进行用超短脉冲准分子激光沉积金属和氧化物制作微结构的相关研究，国内尚无这方面的工作报道。





(d) 工蜂腹部的电磁天线

图 6.17-9 MAPLE DW 样品（来自 T.Wholers reports 2004）

4 基于激光引导直写的微堆积制造方法

本节重点介绍基于激光引导直写的微堆积制造方法。这项技术从其制造学的本质来看，与快速制造离散-堆积的制造原理是一致的，因此可以将激光引导材料粒子的物理过程与快速制造的信息处理过程集成到一个系统中成为一种新的堆积制造方法。

4.1 成形系统

图 6.17-10 表示以激光引导为使能技术的堆积成形系统可能的实现方式。系统可包括数个针对不同材料粒子的直写腔，每个直写腔由聚焦透镜组、微粒悬浮腔、输出通道（空心光纤等）组成；激光光束经变换后在计算机控制下入射到

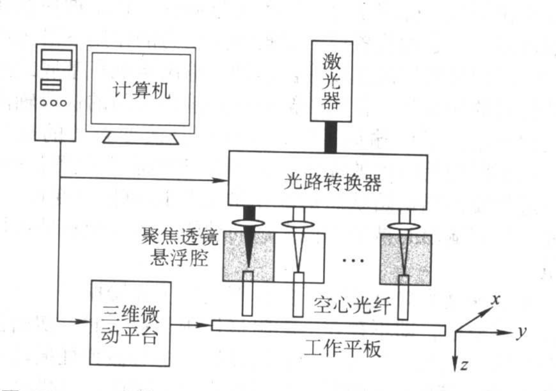


图 6.17-10 以激光引导直写为使能技术的堆积成形系统方案

指定的直写腔，进行材料选择和直写操作；三维微动平台带动工作平台运动实现选定材料微粒的空间定位。要制造的结构的三维数字图像模型在计算机中被转译为控制信息，指挥执行部件进行光路转换，选择当前欲操作的材料，同时驱动数控运动系统在 xy 平面进行扫描，两者联动将材料微粒堆积在合适的位置上，如此层层堆积，装配形成所需的结构。

图 6.17-11 所示为简单激光引导直写系统的原理图。激光器输出的水平单横模光束，经过倒置望远镜扩束，压缩发散角，再经过凸透镜聚焦获得用来进行引导操作的光束，不同的束腰半径可通过改变扩束透镜组和聚焦透镜的组合来获得。

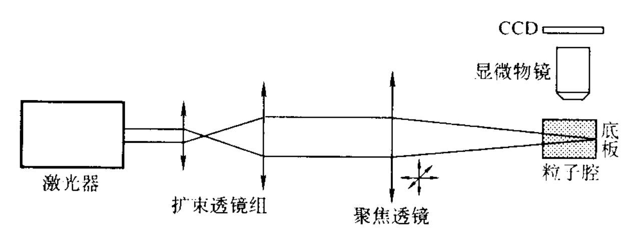


图 6.17-11 激光引导直写系统原理

粒子分散悬浮在适当的透明液体（某些应用中使用气体）介质中，一方面利用介质的浮力来平衡部分重力；另一方面黏性介质为粒子的运动过程提供一定的阻尼，使粒子输运能够趋于稳定状态。悬浮液密封在一个小尺寸的玻璃容器内，减小液体的自然对流从而降低干扰；容器厚度与聚焦光束的瑞利长度相当，保证在进行引导操作的光束段内有足够的光强。将容器安装在光束的焦点附近，入射面正对光束，底板处于光束焦点位置。

在粒子腔侧面用显微镜观察粒子的输运过程，调节物镜使之对准进行引导操作的光束区域，在目镜前安装与计算机相连的 CCD，将输运过程以视频文件的形式记录。由于普通显微物镜焦距较短，因此粒子腔正对光束的横截面尺寸应当比较小，同时腔壁应当比较薄以免与物镜发生干涉；降低粒子腔尺寸的另一个好处是可以减小对流。

4.2 粒子的捕获和输运

激光引导直写对微粒的操作过程按粒子的行为可以分为三个阶段：捕获、输运和沉积阶段。

首先是捕获阶段，粒子最开始分散悬浮在介质中保持相对静止或随着介质的流动而运动；在光束作用下，粒子在光束径向受到指向光轴的光场梯度力的作用，在此作用下向光轴靠拢，最后停留在光轴或光轴附近横截面上的受力平衡位置，对光轴位置保持相对不变，这个过程称为粒子的捕获。捕获过程将受作用的粒子约束在光束径向的一个小区域内形成连续粒子流，确定了直写过程的指向性。粒子被捕获在光轴附近相对固定的位置后，在轴向光压力的作用下沿光束传播方向以相对稳定的速度往前运动，输出至沉积基底或进入辅助传输的光纤管。自粒子被捕获到输出之间的这段轴向运动过程就是粒子的输运过程，其作用是改变粒子的空间位置，将不同初始位置的粒子传输到指定的输出位置；同时，输运过程使不同初始状态的粒子的输出运动状态变得一致，并使它们在输出时携带相似大小的动能，为沉积和粘接提供能量。

光场梯度力对近轴粒子的作用近似于弹簧振子，如果系统位于真空中，即不存在运动阻尼作用于粒子时，初始位置不在光轴上的粒子被捕获后将以光轴为中心做弹性振动，这样各粒子在横截面上的位置是不确定的，因此必须借助于介质（液体或气体等）来引入运动阻尼。离轴粒子在光场梯度力的作用下加速向光轴靠近，介质阻尼的存在对它的运动速度进行衰减，使其运动速度的径向分量逐渐降低为零，这样粒子只作轴向直线（或近似直线）运动，这是粒子输运指向性的保证。

然而，作为介质的液体或气体的存在也带来一些新的问题。首先介质折射率减弱了光力；其次粒子在介质中受到浮力作用；更关键的是介质对激光的热吸收会引起对流，这些都是引入介质后对输运过程的不利因素。

重力、浮力、对流等对光束水平传播的输运过程做横向干扰，这些干扰作用的效果改变了光场梯度力所构成的力阱的位置，粒子在光束横截面方向的受力平衡位置也随之改变，使得粒子流的输运位置偏离光轴。利用光场梯度力的等值线图可以预测一定干扰力下输运轨迹的形状和对轴的偏离距离。同时光场梯度力的最大值也决定了输运过程所能容忍的最大干扰力，超过这个值，所有粒子都将从捕获中逃逸。

输运过程通过输出粒子的速度为后续的沉积和粘接过程提供能量，因此粒子的输运速度是一个重要参数。介质的阻尼作用消除了各粒子之间初始状态的差别，在输运轨迹上各点处不同粒子具有相似的运动状态。粒子在输运中处于准平衡状态，根据斯托克斯公式可以写出输运速度的估算公式，输运速度与该位置的光压力成正比，因此光束参数对输运速度的影响与对光压力的影响相似。

采用与光力计算相同的坐标系，考虑粒子的重力、浮力、横向对流干扰，可以求得其运动方程：

$$\boldsymbol{v}' = -b\boldsymbol{v} + \boldsymbol{a}_1(\boldsymbol{r})$$

$$b = \frac{6\pi\mu r_p}{m} = \frac{9\mu}{2\rho_p {r_p}^2}$$

$$\boldsymbol{a}_1(\boldsymbol{r}) = (1 - \frac{\rho_M}{\rho_p})\boldsymbol{g} + b\,\boldsymbol{v}_{conv} + \frac{\boldsymbol{G}_{LMT}(\boldsymbol{r})}{m}$$

根据实际系统的边界条件，用数值方法解此方程，可以得到粒子运动过程。图 6.17-12 为单个粒子的输运过程轨迹。

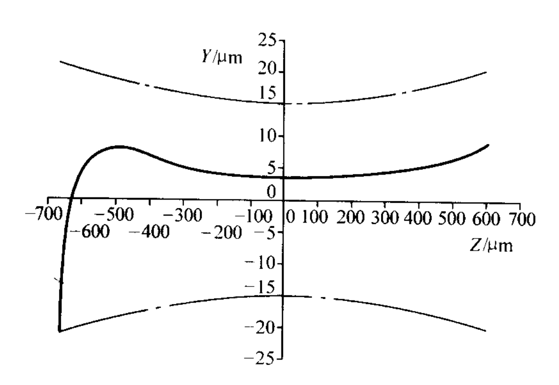


图 6.17-12 单个粒子的运动轨迹

以聚苯乙烯粒子为例进行实验观测。初始状态显微镜下可见聚苯乙烯粒子静止悬浮于水中。开启激光，可立即观察到光束照射到的粒子受牵引向着底板方向移动。图 6.17-13 所示为聚苯乙烯微粒在 200 mV 入射光功率下的输运过程。图中光束传播方向从右向左，各帧图片的时间间隔为 0.14 s，显示了 a，b，c 三个粒子分别在光束引导下的轴向运动，估算可得粒子的运动速度大致为 200 μm/s；左边亮斑处为底板所在位置，输运粒子到达此处后在上面逐个堆积，激光散射逐渐增强，因此实验中可观察到随着粒子的逐步输运，底板上的亮斑逐渐变亮变大。改变激光功率，可以观察到粒子的运动速度也随之发生变化，功率越大，运度速度也越快。

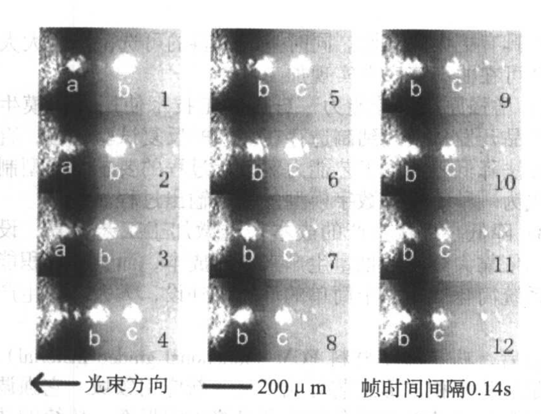


图 6.17-13　PS 微粒激光引导输运过程
（清华大学激光快速成形中心提供）

4.3　粒子的沉积

输运之后的粒子直接或者通过空心光纤等辅助传输在基底上进行沉积和接触，根据不同的机理相互粘接，这是粒子的沉积过程。沉积过程与粒子的材料属性和应用方向紧密相关，不同的材料、悬浮介质和基底的沉积粘接过程具有不同的行为和机理。

在输运过程中移动正对光束的底板位置，可在底板上不同位置沉积微粒，这样可以获得粒子构成的平面图案。图 6.17-14 为粒子沉积过程的示意图。理论上，粒子在输运中将按同一条轨迹线输出。因此当底板不动时，粒子将以一定的速度接近底板并在上面同一个位置进行沉积，逐渐堆高。但实际上由于在底板附近，液体的流动比较复杂，如既有对流造成的横向分量，又有粒子运动引起的轴向分量，还有底板阻挡引起的反轴向分量，这些因素破坏了粒子原本在输运过程中的横向受力平衡状态，因此不能保证沉积在同一点。此外，已沉积的粒子使基底的形貌发生变化，粒子着陆时基底对它会产生偏向一侧的作用力，在光压的挤压作用下，待沉积的粒子会以输运轨迹为中心向四周散开，如粒子 A 所示。另外，粒子进入轴向输运前有个捕获过程，粒子逐渐向输运轨迹靠近，如粒子 B 所示。当粒子初始位置在底板附近时，如粒子 C，在捕获过程未完成前，轴向位置已经到达底板，就无法堆积到输运流指向的位置上。这些因素就会在指定沉积点位置的周围形成“行星粒子”。

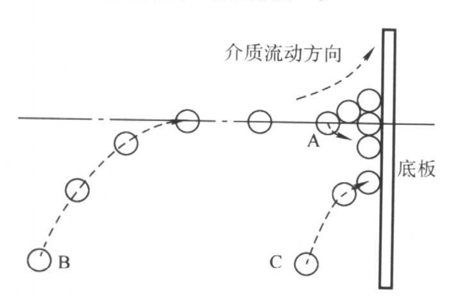
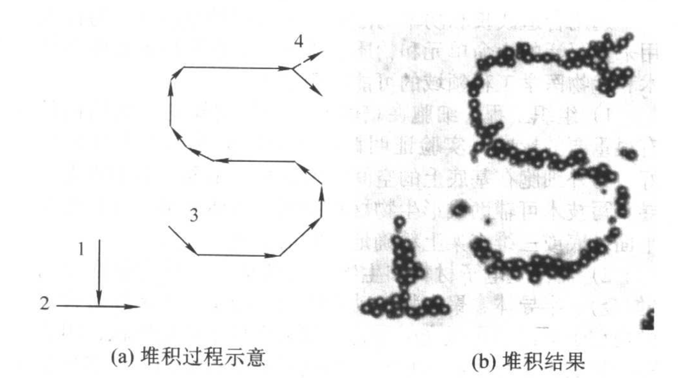


图 6.17-14　粒子沉积过程示意

以聚苯乙烯粒子为对象考察激光引导直写的结构构造能力。

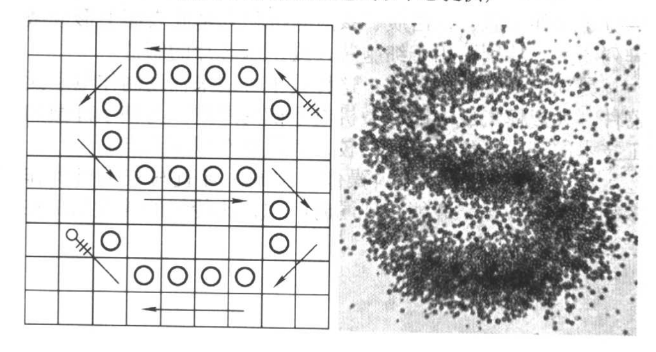
图6.17-15 是快速沉积粒子获得的图案。粒子半径为 5 μm，实验使用激光功率 500 mW，光束束腰半径 15 μm。沉积轨迹如图 6.17-15a 所示，先沿 1 和 2 的方向沉积倒 T 型图案作为定位标志，然后按 3 所示路径调节微动平台的两个轴以获得 S 型图案。实际实验中手动操作微动平台，平均每点位置上沉积时间为 10 s，微动平台每次步进 10～15 μm，水平方向总共步进 10～12 次，竖直方向步进共 15～17 次。沉积过程近似为连续状态，在沉积最后，对竖直方向微动平台的操作出现失误，反向沉积一个点后又回复正确路线完成沉积。

沉积结果如图 6.17-15b 所示，较好的符合了设计期望，由于步进和时间间隔参数选择合适，操作时又较平稳的模拟了连续扫描过程，因此图案线宽较均匀，平均为 2 个粒子宽度，各点间的前后连接过渡情况较好。右上角由于误操作而出现的多余部分也准确的反映在沉积图案之中，图案中的特征比较精细。



(a) 堆积过程示意　　(b) 堆积结果

图 6.17-15　粒子快速沉积图案实验结果（聚苯乙烯小球半径为 5 μm）
（清华大学激光快速成形中心提供）



(a) 堆积过程示意　　(b) 堆积结果

图 6.17-16　粒子慢速沉积图案实验结果（PS 小球半径为 5 μm）
（清华大学激光快速成形中心提供）

改变实验参数，用较慢的沉积速度来构造相似的“S”形图案。设定激光输出功率为 300 mW，光束束腰半径为 25 μm，每点沉积时间增长到 10 min，各点距离为 100 μm，沉积轨迹如图 6.17-16a 所示，共沉积 18 个点。沉积结果如图 6.17-16b 所示，由于各点沉积的粒子比较多，在基底上铺展范围较大，行星粒子相互交叠，使各个迹点能相互连接，但也带来许多噪声；各点中心粒子堆积较厚，照片上较暗的部分能清晰反映出沉积过程的各点轨迹；最后一个点由于沉积时间稍短，因此粒子数明显减少。另外，由于整个实验过程时间较长，约 3 h 左右，先沉积的点受液流的冲刷等作用，聚集的粒子又重新分散，图中显示最初沉积的几个点已接近消失。

由两组实验对比可看出，快速沉积获得的结构具有较高的精度，特征尺寸主要依赖于个别粒子本身，不同位置呈现比较大的波动；而低速沉积的结果比较均匀，但是精度较低，结构特征以聚合在一起的大量粒子的包络形式构成。

4.4　应用前景

这种新的堆积成形方法的主要优点是：①理论上可以生成任意复杂形状和内结构的实体；②能集成多种材料（实际上也是一种复合材料制备工艺），实现材料连续/非连续梯



度；③目前的技术手段已经能获得微米量级的结构特征尺寸；④对单个材料粒子进行操作，沉积和连接过程所发生的物理、生化反应范围小，可控性强，整体变形小；⑤可以利用数字信号处理和图像工程的概念来分析和评估三维器件的设计和加工过程；⑥工艺柔性大。

由于这些优点，激光引导直写技术及以此为使能方法的堆积成形方法不但在微制造、功能梯度材料的成形等传统的制造领域具有广泛的应用前景，同时还是制造技术与生命科学及生物医学领域交叉的关键技术之一。

选用合适波长和功率的激光，可以将激光引导直写技术用来直写活的生命单元和物质。激光引导直写技术在生物技术和生物医学工程领域的可能应用如下。

1）组织工程　细胞在培养时，载体支架的三维结构具有很重要的影响，实验证明该结构越接近人体组织环境越好；另外细胞在基底上的空间定位也相当重要。利用激光引导直写技术可辅助成形生物材料的细胞载体支架，并且可在平面基底或三维支架上精确地沉积活细胞。

2）器件上电子材料和生物材料的集成　目前包括金属（如金）、半导体、聚合物、动物细胞、硅藻、细菌和微管等微观粒子都已经用激光引导直写技术实现了成功堆积，用直写堆积的方法将生物活性粒子和电子材料集成到一个芯片上完全是可能的。

3）微阵列的装配　可用激光引导气悬液体微粒或者生物分子（如细胞、蛋白质、核酸）沉积到基底表面上形成微阵列图案，特别可用于细胞芯片或基因芯片的制造。

另外，在微制造领域，这种技术可用来辅助制作电子元器件、大规模集成电路和微机电系统的原型。与基于硅微加工技术的产品开发过程相比较，其优点有以下几点。

1）能同时进行多材料操作　激光引导直写技术可操作多种材料的粒子，并能实现同时沉积，比传统的硅微加工在材料上具有更大的柔性。同时基底材料的可选范围也大大拓宽，并可在曲面基底上实现加工。

2）增强原型设计能力　硅微加工技术使用大规模生产线，产品开发从设计到制造存在复杂的反复试验过程，直写堆积方法降低了加工工艺能力对设计过程的要求，原型制造有望成为一种简单的数字模型的快速输出过程。

3）降低小批量生产的成本　硅微加工工艺繁复，设备昂贵，依靠大规模的批量生产来分摊成本，而直写堆积能使制造系统简化成为一个简单的计算机外设，大大降低生产成本。

最后，功能梯度材料 FGM（functional graded material）的成形是这种堆积成形工艺可能的又一新应用领域。它强调所合成材料的连续性的成分梯度和最终组织形态，传统的功能梯度材料制备工艺通过改变工艺中各个材料组分的相对配比和其他一些工艺参数来实现材料的梯度分布，而利用堆积制造方法的优势体现在如下几方面。

1）将材料制备与零件成形统一　离散-堆积制造由于“增材”的工艺特点，不但是零件成形过程，也是材料制备的过程；当多材料处理成为可能后，功能梯度材料的制备和成形可以比较容易的统一在一个材料加工过程中。

2）可精确控制成分的几何梯度　材料以点为单位进行堆积使成形体内部的材料成分分布处于计算机的精确控制之下，不但易于实现材料的梯度分布，而且将原型的概念引入材料设计，提高了某些功能梯度材料的设计效率。

3）可构造复杂内结构和外形状　面向多种材料和对材料逐点操作的处理能力使含有复杂结构和形状的零件的制造瓶颈从加工方法转变为设计和表达问题。

编写：陈立峰（英国伦敦大学玛丽皇后学院）



第 18 章 生 物 制 造

1 生物制造概论

1.1 概述

20世纪以来，科技的发展使人们对生命现象和生物体的微观结构有了深入的了解，从而体外模仿构建具有一定生理功能的结构和组织，用于病损组织的替代或疾病的快速检测等都成为可能。同时，这些复杂结构和组织的组装和制备向传统的制造科学提出了新的挑战。生物制造工程的概念就是在这样的背景和需求下提出和发展起来的。20世纪90年代末期，人们就提出了生物制造（bio-manufacturing）的概念，但是由于概念的定义和内涵不够清晰，对于制造科学和技术的发展没有起到太多的指导作用。

生命的机械论观（mechanistic view）是生物制造的哲学基础。与18、19世纪流行的活力论（vitalism）和泛灵论（animism）观点不同，机械论观点认为可以用物理和化学定律来解释所有生命现象，生命现象说到底是一系列物理和化学反应的结果。生命的机械观、细胞的演化（由简单到复杂）及细胞聚合为细胞群体，是从现代细胞学中归纳出来的，并为实验所证实了的基本观点。

法国生物学家R.J.H.Dutrochet和德国哲学家L.Oken最早提出细胞为生命的基本结构单元之观点，德国植物学家M. Schleiden和德国动物学家T. Schwann将细胞的概念提升为科学界最重要的理论之一，认为生命的基本单元是细胞，每个细胞就是一个生命实体。

21世纪，制造科学与生命科学相结合，是制造科学发展的主要前沿研究。这种结合体现在三个主要方向上。

1）模仿生物的方向，即仿生机械学与仿生制造。模仿生物，即研究生物体的行为、结构、机构和功能与其几何、物理、化学和材料等特征的关系，形成仿生机构与机械学，功能表面仿生，仿生接触力学与仿生摩擦学等。自古以来，自然界就是人类学习和模仿的对象和源泉，仿生学被认为是永恒的科技前沿。

通过生物过程的利用将制造科学与生命科学结合起来。生物过程归根到底无非是物理过程、化学过程和信息过程以及它们的复合过程。

2）利用生物过程方向，即生物质制造（OM – Organic Mass Manufaclturing）

① 通过设计型蛋白质、酶、生物催化等，制造与能源、食品、医药、材料等有关的产品。

② 具有计算和记忆功能的生物型装置，包括生物存储和逻辑装置（具有识别环境刺激、学习和适应变化等优点）。生物芯片也可划归于此一类。

③ 利用细菌侵蚀的材料加工、成形和装配。

3）组织器官的人工制造，即生命体制造（organism manufacturing）

生命体制造，是将细胞、细胞外基质及生长因子等经过间接或直接受控组装，形成具有一定结构和功能和三维实体或生命体，用以重建或修复病损的组织器官。

① 组织器官的建模　指用于组织器官人工制造的数字建模及医疗辅助。

② 假体的设计与制造　主要指组织器官制造的初级阶段，包括相容不降解的人工替代物及其有一定功能的人工装置。

③ 组织工程支架及组织工程　主要指制造可降解的人工制品。

④ 复杂器官人工制造　主要指制造心肌和肝等复杂器官。

1998年由美国国家科学研究委员会工程技术委员会、制造与工程设计院组建了“21制造业挑战展望委员会”，其主席Dr.J.Bollinger在《2020年制造业挑战的展望》中提出了生物制造概念，包括5方面内容：①仿生结构与材料；②生物作用过程进行成形和装配；③设计型蛋白、酶、组织体素和生物催化；④食品和生物装配；⑤计算和记忆功能的生物型装置。

Dr.J.Bollinger特别强调能引起21世纪制造工艺变革的两大技术是：纳米技术和生物制造技术，因为这两类技术都涉及到在分子和原子级别上的精密控制和组装。由此，我们可以看出学科界线的模糊性和学科交叉发展的必然性。Dr.J.Bollinger在1998年还未看到生命体人工制造的方向。

细胞是物理的存在，具有物理学特性（尺度、形体、重量、可以运动、互相“咬合”形成结构等）。在细胞内可以进行自组装的自我组合过程和在基因的调控下合成蛋白质大分子的复杂过程。蛋白质分子又进一步通过自组装形成更为复杂的分子。自组装产物的形状、物理和化学特性不受外界控制，是由参与组装的分子本身特性和组装微环境所决定的。虽然我们不能改变自组装产物的物理、化学特性，但我们可以创造或消除自组装的条件，从而控制自组装的进行或停止。自组装是现代细胞分子生物学的基础，是生命机械观的主要支持论据之一。

随着物理、化学以及数学界的科学家进入生物科学领域，使之由描述性科学发展为说明性科学。不同学科的进入，不但带来了它们的理论思维，而且也带来了它们的实验方法和工具，在这方面应首推物理学对生物学的影响。制造科学进入生物学范畴始于20世纪下半叶，由于生命科学、生物学、医学、检测和分析仪器、组织工程、介入治疗的需要；特别是生物和生命科学的发展进入分子、大分子、超分子的微观层次；在实验与研究手段上，生物材料的发展和生物材料加工方面对制造科学不断提出新的问题，大大促进了制造科学与生命科学的融合。20世纪中后期信息技术与制造技术相结合而产生的快速制造技术，特别是其所依据的离散-堆积成形原理大大拉近了制造科学与生物生命科学的距离，进一步促进其结合。离散-堆积原理的核心实际上就是组装的概念，一种计算机辅助的受控组装的概念，它贯串了从宏观单元、介观单元到微观单元的不同层次的受控组装。

上述生命科学和生物学方面的成果与制造科学中的离散-堆积成形理论、微制造以及激光等高能束、数字喷射等使能技术结合起来，已将我们引导进入一个全新学科和工程领域，这就是生物制造。

根据生命机械观，原则上讲，发生在细胞内和生命体的物理化学现象、生理生化过程都是可以在人工条件下再现的，人类将来某一天，可以装配蛋白质大分子，也可以用细胞“制造”组织和器官，应该说这就是生物制造的本质。

1.2 生物制造的科学技术背景

1.2.1 制造科学技术背景

制造技术与人类文明相互促进发展，加工对象从天然材料到人工改性和合成的各种材料，发展到今天已经能对活的生命单元——一种特殊‘材料’，细胞进行操作。对以细胞为代表的生命基本组成单元作为加工对象的使能手段是生物制造的基础之一。现代材料加工使能技术的发展已经到了可以实现这一目标的程度，有多种方法能够对活细胞之类的生命活物质进行操作，比如微滴喷射方法和激光引导直写技术。这些技术的产生与发展为生命体制造提供了核心的使能手段。

另一方面，基于离散-堆积成形原理的快速原型制造方法使现代制造技术发展到一个新的高度。这种成形思想比传



统的去除成形和受迫成形具有高得多的三维实体内外结构（形状）控制能力，而且能够自由地操纵和组装多种材料以完成材料梯度结构，也易于将单元化的材料与数字技术相结合，实现工艺过程信息化和自动化。将离散-堆积成形思想与现代直写方法相结合，可以发展为生物制造的核心操作技术，来构造空间的组织支架和由细胞组成的三维结构。图6.18-1是组装工艺路线图。

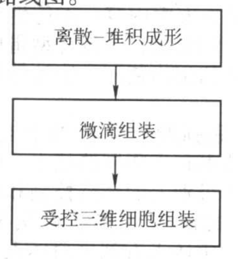


图 6.18-1　生物制造组装工艺路线图

1.2.2　材料科学技术背景

新的生物材料的研究与应用是生物制造工程的重要基础。从20世纪90年代开始，第三代生物材料诞生，与第一代的生物惰性材料和第二代的生物可吸收材料、生物活性材料不同，第三代生物材料集成了生物活性材料和生物可吸收材料的性能。通过分子改性，可以在生物可吸收聚合物中引入对细胞产生特异性反应的部分，从而控制细胞的粘附、增殖、分化和细胞外基质的产生。这些生物材料的组成和性能可以根据人体组织器官制造的生理学、生物化学、生物物理学和成形学需要，进行设计和合成，这就为其在生物制造工程中的应用创造了条件。

1.2.3　生物学基础

分子生物学和细胞生物学是生物制造的生物学基础之一，20世纪50年代，DNA双螺旋结构的提出，从此生物学的研究进入了分子生物学时代，二战以后25年间的分子生物学进步使其提升到分子的层次，在这个层次上总结了一系列生命物质和生命现象的基本规律，并发展了诸多的交叉学科，如生物大分子科学，细胞力学，软物质科学等，尤其是分子层次上有关细胞组成、结构和相关生命活动的研究，成为支撑直接操作细胞的基础。另一方面，干细胞研究的成果为生物制造的主要“原材料”——细胞，提供了丰富的来源，具备强大分化潜能的干细胞是生物制造所需的主要材料来源。20世纪末有关干细胞研究的巨大成就，被列为20世纪世界十大科技进展之首。

人们已经看到生命体的最基本过程最终可以归结为物质和能量的新陈代谢，与生命现象密切相关的组装过程的能量转换与传递是守恒的（服从热力学第一定律）。组装过程一般是非平衡、非线性和不可逆的过程，它遵循熵变原理。当代生物技术特别是分子生物学的发展，使得对核酸、蛋白质、多糖、生物膜等大分子的研究已十分深入，随着人类基因组计划以及后基因组研究的开展，人们对生命奥秘的了解已从朴素的生命机械观发展到分子和原子的层次。细胞的分离、纯化和大量培养、生物大分子合成与改性、基因的切割与重组已具有比较成熟的技术。

此外，工程科学、生物医学技术和信息技术等领域的一些最新进展也为生物制造提供了技术支撑。如生物材料、细胞力学和软凝聚态材料等方面的研究已经提供了有关这些特殊材料的基本理论和规律，使得从制造的角度研究这些材料的加工特性成为可能；影像医学、生物力学和反求技术等方面的研究为人工器官的个性化设计和建模建立了良好的基础。

又如激光医学等研究给出了生物大分子、细胞和组织等在高能束作用下的生理行为和形态变化。生物制造过程从产品设计、材料制备到成形加工，以及后续的性能检测和生物学评价均能在当前技术科学的最新进展中找到支撑。

1.3　生物制造的定义

由上述分析可知，生物制造在生命科学与制造科学迅速发展与不断交叉的背景下产生与发展，以组织或器官的人工修复、替代和人工制造为目标，可以从比较广泛和比较狭义两个角度来定义。

广泛定义：从生命科学与制造科学相结合的三个方向即仿生、生物过程利用和生命体人工制造来定义生物制造为广义生物制造。其定义为：制造科学与生命科学相交叉的仿生、生物质制造和生命体制造的新型科学与技术。事实上，所有涉及到生命科学、生物学和医学的制造科学和技术均可视为生物制造，用BM（Bio-Manufacturing）表示。

狭义定义：仅从生命科学与制造科学在生命体人工制造相结合的方向上来定义生物制造为狭义生物制造。其定义为：运用现代制造科学和生命科学的原理和方法，通过多种细胞或细胞团簇的直接和间接受控组装，完成具有新陈代谢特征的生命体的成形和制造，经培养和训练，用以修复或替代人体病损组织和器官。在以下的讨论中，均以狭义定义为准，用OM（Organism Manufacuring）表示。

1.4　细胞受控组装

在讨论细胞受控组装前，应对材料微滴受控组装进行分析和讨论。微滴组装是一种在宏观尺度上的离散-堆积成形技术。材料的离散是材料单元化过程，当用来进行堆积的单元为0.1～0.5 mm量级时，我们称为微滴组装，见图6.18-2。单元尺度的变化将引起组装技术等一系列重要变化：从采用杠杆、奴隶劳动组装金字塔到微滴喷挤技术组装组织工程支架和细胞直写技术操纵组装单个的细胞，这个进步跨越了人类历史5 000年。单元尺度的微细化是人类认识世界的进步，也是制造科学技术和工程上的进步。

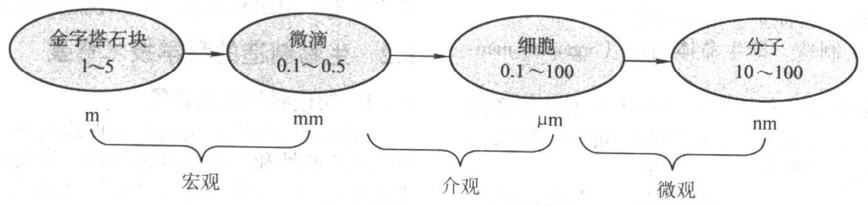


图 6.18-2　单元尺度图

微滴组装是生物制造的初级阶段，但它包含了全部生物制造的哲理和内涵且是可近期达到实际应用的阶段，它的外延就进入细胞和分子阶段。

微滴组装是生物制造的重要组成部分。根据形成微滴单元的材料的生物降解性和生物相容性可以分为非相容、相容不降解和相容并降解三个层次。

非生物相容材料的微滴组装技术大量用于组织和器官模型的制造，即将其解剖学数据（电子模型）通过数据通道转换为物理模型。这种从人体复杂结构中选择性拷贝下来的按比例的模型是在手术方案规划、医务人员与病人和家属沟通



和假体制造时所需的物理模型。当前，在人体解剖学数据的提取，器官的重构和建模、电子模型与成形系统的数据转换以及工艺和设备仍需进一步完善和发展，这是生物制造发展所关注的问题之一。

生物相容而不降解材料的微滴组装技术是用于植入体内的人工假体设计与制造之核心技术。围绕植入体内而展开的诸多生理生化问题是一般制造科学所未遇见的新课题。如成形过程带来生物材料性质的变化、材料表面与人体（细胞）之相互作用和界面问题等等。生物制造所完成的人工假体在骨与软骨、骨盆和关节缺损修复、介入治疗中已有成功应用的案例。

生物相容而降解材料的微滴组装是组织和器官诱导生长的核心技术之一。通过生物制造受控组装工艺所构建的三维精细结构对细胞进行培养使细胞的培养技术上了一个新台阶。对于具有高孔隙率的结构和材料梯度三维结构，微滴组装是唯一可行的有效的制造方法。此类微滴组装技术与其它领域如组织工程领域的技术相结合，必将大大推动学科的发展。

当离散-堆积成形原理由宏观尺度进入介观尺度时，微滴组装发展到细胞组装层次，这是生物制造中意义深远的一个进步。从制造科学来看，细胞组装是一种介观尺度上的离散-堆积成形技术，细胞是一种‘材料微滴’（单元），一种有形状，有体积，有重量的物理实体；从生命科学看，细胞又是生命的基本单元，每一个细胞都是一个生命实体。组装细胞就是按制造科学的概念来设计并装配由多种细胞形成的结构。显然捕获、输送和精确定位细胞以实现这个由细胞组成的复杂的“物理结构”，具有重要意义。这个物理结构的生理、生化特性和功能，与细胞单元组装过程和后续培养和训练显然有着直接的联系。随着对细胞定位、操控、排布沉积技术的日趋成熟，以及细胞间信号传导和相互联系以及不同的细胞间交互作用研究的深入，设计与制造具有特定生理功能的复杂三维结构已开始纳入人们的研究计划。对此种结构，我们称为具有生命特征的组织器官前体类似物或类组织前体（tissue precursor analogy），或称为器官胚体（organ embryo）。它还不是一个组织（tissue）更谈不上器官（organ）。它是由细胞组装成的细胞群体，是一种具有发育成组织和器官潜能的、动态的、过渡性的生命体，它是一个具有新陈代谢特征的开放系统，为细胞-细胞和细胞-信号分子之间互相作用创造良好的生理、生化、材料和形态结构环境，保证经协调、顺序的培养、各种物理训练，经重塑和时效而完成正常性功能的组织和器官的三维结构。从信息科学的角度，也可以视为通过数字通道所形成的可以培育为组织和器官的具有生命的三维实体。

显然，操作单个细胞完成组装成形从原理上讲也是可行的，但可能更好的办法是将细胞与其仿生外基质生物材料形成的“细胞材料复合体”即材料-细胞单元组装成形，这样一方面可以更好地帮助和保护细胞承受组装过程中的各种物理化学条件的变化，另一方面也较易满足成形技术对材料成形性的要求。在类组织前体的三维成形过程中，细胞是作为生命单元（不仅是具有活性的材料）去构造具有生命的结构。材料-细胞单元的组装过程，既要满足数字精密喷射技术的要求：如黏度、固化速度、表面张力、压力等；又要满足生物学的要求：温度、酸碱度、通透性、孔隙率、无菌性要求、降解率、强度、溃散性……等，这已成为生物制造中十分重要的问题。组织和器官无论从结构和材料成分上都是十分复杂的，因此需采用对多种细胞和材料能制导的精确定点定位喷射方法和技术。有时还应将含有生长因子、生物大分子、以及具有基因片断的材料微滴与细胞选择性喷射结合起来以构建各种类组织前体。

细胞的组装属计算机辅助受控组装，即根据被组装三维实体的电子模型控制使能技术和组装平台系统完成细胞-材料单元的堆积和连接的三维组装。显然，这种受控组装过程与分子自组装是不同的。从制造科学与生物学相结合的角度看，一方面人体器官是一种特殊的产品，它不但具有一般产品的形状、尺寸、精度等要求，更为重要的是它为细胞提供了一个特殊的微环境，这种微环境保证了物质和能量的交换以实现各种生理和生化过程——这是其功能方面；另一方面，它是一个动态组织系统，它可以连续地自我产生其结构，生物制造的贡献在于开启了这个动态组织系统的初始状态，以保证它可以连续稳定地“运行”下去。

人工制造类组织前体是生物制造中的新概念，它跨越了生命科学与制造科学的鸿沟，将数百年来存在人们认知中似乎是毫不相干的两个领域和体系结合在一起。类组织前体是生命机械观的具体体现，不管类组织前体的设计、制造和由其发育、培养成组织和器官还有多少技术性的困难，也不论还要经历多少时日，但根本的一点是可以肯定的，直接采用生命实体单元——细胞，人类是可以设计和制造具有生命的组织和器官，在此处并没有不可跨越的障碍，不存在人类永远无法认识的问题。

分子受控组装是离散-堆积成形原理从介观尺度进入微观尺度的进步。材料科学领域在分子自组装技术方面的应用与研究取得了丰硕的成果，但在制造科学方面尚属空白，尽管如此，这种发展和进步的必然趋势是很明显的，这是生物制造长期发展所追求美好的远期目标。

人们可以通过现有的生物学方面的技术大量获得细胞。如用各种酶将现有组织的外基质去除而获得单个的细胞；也可通过干细胞定向诱导、纯化并大量扩增而获得细胞。细胞受控三维组装既是当前生物制造研究的热点之一，也是其核心技术。细胞外基质材料的研究与应用对细胞三维受控组装具有决定性的影响。细胞受控三维组装的前提条件是器官和组织的三维数字化建模，在数字模型的控制下，通过离散-积成形原理采用各种使能技术特别是微滴-微流喷射-挤出技术完成细胞（包括细胞-外基质材料单元）的受控三维组装。

1.5　细胞受控组装的技术路线

细胞受控三维组装的技术路线可分为间接受控三维组装和直接受控三维组装。

细胞间接受控三维组装采用生物相容性优良的生物可降解材料，根据组织或器官的结构要求完成具有分级的高孔隙率三维结构，其孔隙率可达85%～95%；然后在此支架上种植（沉积）细胞及生长因子，随着细胞在支架上的繁殖增长，支架降解，最终细胞取代了材料，按照材料支架的结构而组装起来，完成三维成形。很明显，这就是组织工程（tissue engineering）的基本原理和方法。从制造科学的角度分析，组织工程支架成形所处理的仍然是无生命的材料，尽管该类材料具有良好的生物相容性、细胞贴服性、细胞诱导性和细胞传导性，但成形操作的仍不是具有生命特征的活体。综上所述，在生物制造学科中，上述过程可称为细胞间接受控三维组装。

细胞直接受控三维组装。成形过程中，操作和控制的是具有生命的活体，即多种细胞或细胞团簇与仿生外基质材料组成的单元。这种成形制造无论从生命科学和成形科学来看均具有重大的科学意义。从生物科学的角度看，它突破了在DNA调控下通过细胞的自组装自装配来构建具有三维结构生命体，而是在计算机电子模型（人类意志的体现）的控制与管理下通过连接与装配而获得具有生命特征与功能的三维结构。这是地球上有了细胞35亿年后才出现的事情。从成形与制造科学的角度看，制造科学已大大向外延伸到与生命

科学相交融的境地，制造一个机器零件与制造一个前体（Precursor）所涉及到的制造理念和技术本质上是一样的。根据人类的要求（设计）将不同特性的单元体（大到数吨的石头，小到分子）按不同的精度，不同的顺序，不同的效率完成空间排布，单元间彼此实时地连接起来，形成一个有具体复杂结构、特定功能、有限寿命、稳定的实体。人类加工材料形成器件有数十万年的历史，而加工具有新陈代谢功能的活的‘材料’则是人类刚刚迈出的一大步。

直接受控细胞三维组装目前常采用两种工艺路线，即细胞直写法与细胞喷射法。前者利用激光的粒子性，采用特殊波长（如 800 nm）激光，通过光压去捕获悬浮于培养液中的单个细胞并将它引导（推动）到建立于微动工作台上的平面结构中，重复平面组装过程以构建一个三维结构，这在第17章中已有论述；后者则采用各种微滴喷射技术（droplet jetting technologies）和微流挤出技术（micro-flow extrusion technologies）将材料-细胞单元定向定点喷出（挤出）形成一个平面，如此重复迭加平面，形成三维结构——类组织前体。

根据前述，可将细胞三维受控组装的技术的分类表示为图 6.18-3。图 6.18-3 中所谓的细胞，实际上包括多种细胞、细胞团簇（细胞-仿生外基质材料单元）、遗传物质（DNA）、生长因子以及抗生素和其他蛋白质等，是一个较宽泛的概念。

细胞三维受控组装
- 直接组装
  - 单个细胞组装（见第 17 章）
  - 细胞团簇组装（见第 18 章第 4 节）
- 间接组装（属组织工程范畴）

图 6.18-3　细胞三维受控组装的技术分类

1.6　生物制造与其他相关学科的关系

图 6.18-4 指出了生物制造与其他相关学科的关系。

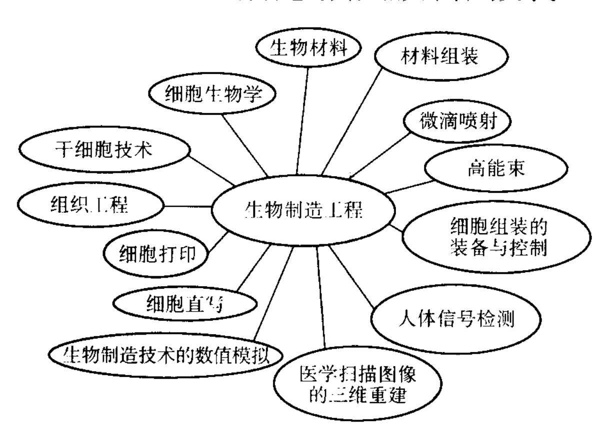


图 6.18-4　生物制造与相关交叉学科

1.7　生物制造产品的特点

与传统制造的产品不同，生物制造的产品不但具有复杂的结构和材料组成，而且自成一个生理系统，具有特定的生命功能，其特点如下。

1）具有复杂材料组成和结构，物理特性随结构分布不均匀，力学性能较低。

2）材料组分存在于不同的生化-结构微环境中，相互之间具有不同界面特性和结合关系。

3）具有一定的生物学功能，为细胞或组织的生长提供生理环境，或直接包含活细胞或组织，具有不同层次的生命功能。

4）由于组分/结构所构成微环境与细胞的作用，产品的组成和结构从微观至宏观会随培养时间不断发生预期的变化，最终处于一种相对的生物稳定和开放状态。

5）从形状至结构以及材料与功能，均可实现个性化的制造。

生物制造工程应保证：

1）能够按照最终临床要求给出所制造的器官/组织的数字模型，根据模型可进行各种层次的模拟或预测；

2）能制造和操作不同尺度的微滴单元，并以多种连接方式将这些单元粘接起来，形成复杂的三维实体；

3）加工过程中不能产生或引入任何有毒物质，不能破坏材料的生物学特性；

4）成形过程应当具有高度的自动化程度和柔性以保证产品的个性化要求。

5）与体内外培养结合起来对所成形的类组织前体进行培养和训练。

1.8　生物制造的体系结构

生物工程、生物技术、生医工程与生物制造的关系见图 6.18-5。

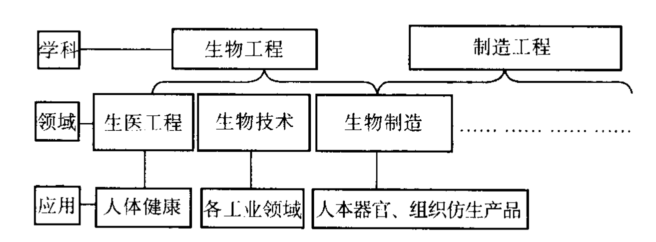


图 6.18-5　生物制造工程学科关系图

1.9　生物制造的应用情况与前景

生物制造从生命的机械观这样一个朴素、明确而简单的概念“所有生命现象均可用物理和化学的词汇来解释”，“生命完全只是物理化学的产物”出发，形成了其哲学理念：任何复杂的生命现象都可以用物理、化学的理论和方法在人工条件下再现，组织和器官是可以人工制造的；生物制造不是制造生命，它并不涉及生命起源的问题，而是用有活性的单元和有生命的单元去“组装”成具有特定功能的组织、器官和仿生产品。制造科学中离散-堆积成形原理应用于受控组装，在宏观尺度上的体现，即为生物材料微滴组装，这是当前生物制造的主战场；在介观尺度上的体现为细胞组装，这是生物制造当今研究的热点，在世界及我国均属刚刚开始。当前国际上主要有美国克莱姆森和南卡罗来纳、英国 BATH 大学和中国的清华大学、德国的弗赖堡研究中心等少数的大学进入这一领域；在微观尺度上的体现为分子组装。在这一领域，科学家们还处在议论和兴趣性探讨阶段，尚未见实质性的科技进展。

生物制造主战场的成果是令人欣喜的。不降解非生物相容的生医模型的应用已进入临床应用阶段，如美国 Align 公司和中国北京时代天使生物技术公司的牙正畸模型和隐型校正器的大规模生产与应用就是证明。颅骨、骨盆、颌面修复用的生医物理模型已经十分普遍；用于复杂骨外科（如车祸、战伤等）手术的原位物理模型逐渐成为骨外科医生的不可缺少的参考模型。

植入人体内的生物相容性良好非降解支架和假体的个性化制造已是比较成熟的技术。如金属（或非金属）假肢以及它们与活体的界面进一步活性化的应用正在逐渐推广。个性化耳、颌面骨等的再造与修复，整容性的颌面再造、植入体内的颅骨支承支架，网板以及其他修复性医疗器件的设计与



制造都从生物制造的发展中受益，并已形成一个以生物制造为核心技术研究与产品开发方向。

细胞的间接受控组装与组织工程结合起来在骨与软骨组织工程、皮肤组织工程、血管与神经组织工程、涎腺组织工程等诸多方面取得了十分重要的成果。

细胞的直接受控三维组装，特别是细胞团簇的受控三维组装的目标已涉及到复杂的内脏器官，如肝脏、心脏、胰腺、肾脏等。此类复杂的内脏器官采用非直接的细胞组装技术（如组织工程）是比较困难的。内脏组织器官的可制造技术是人们孜孜以求的梦想，作为交叉学科成果的细胞簇的三维受控组装已成为目前十分有希望的内脏人工制造技术之一，它以明确、清晰的哲学理念为指导，符合生命科学和生物学的原理，采用自源细胞，避免了一切可能的病毒的传播、排斥免疫反应和克隆技术带来的社会伦理问题。

随着采用生物制造科学与技术完成内脏器官的人工制造的发展，必将引起医学和医疗事业的变化，人体器官银行将存放着人们第二套重要脏器，随时可挽救遭受不测之人的生命，提高成千上万人的生活质量，造福于我国人民和全人类。

2 生物制造的建模

生物制造中的成形技术以快速成形技术为主，因而须以成形对象的数字模型对成形过程进行驱动。因此，建立成形对象的数字模型为生物制造的前提。

2.1 生物制造相关模型及其建模技术

随着快速成形技术的发展，快速成形技术各种工艺的能力得到进一步的挖掘，研究者希望对成形材料的组分有更好的控制以满足复杂功能件的要求，这方面的应用包括组织工程支架的制备。基于离散-堆积原理，许多快速成形工艺都具有成形非均质材料实体的能力，如 3DP、FDM、SDM、DMD 等，但是前提条件是必须建立起相应的非均质材料实体模型。金属材料研究领域中的功能梯度材料和非均质材料比较类似，但是一般用于对金属表面材料性能的改进和增强，难以被快速成形技术采用。对于非均质材料实体的描述，目前还没有类似 STL 文件那样的统一模型和标准。

现有的非均质材料实体模型并不是很多，但其描述手段、控制粒度、与 CAD 系统耦合关系、应用背景却各有其特点：从描述手段上来说，可分为函数描述与非函数描述，其中非函数描述又可分为材料指定与材料运算；从控制粒度上来说，分为全局控制和局部控制；从与 CAD 系统耦合关系来说，分为强耦合（无缝集成）和弱耦合（数据交换）；从应用背景来说，包括了直接 3DP、FDM、金属成形 DMD 等快速成形工艺和有限元分析。非均质材料模型的分类方法如图 6.18-6 所示。

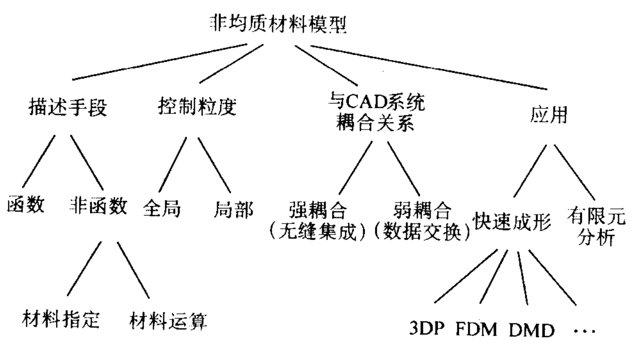


图 6.18-6 非均质材料实体模型分类方法图

以下将分析几种典型的非均质材料模型及其特点。

2.1.1 全局函数材料合成

此类方法通过单一全局函数来表示非均质材料模型，多项式幂函数是其中的典型代表。Michigan 大学的 Srinivas Bhashyam 使用一系列材料合成的多项式幂函数描述了特定位置材料各组分的体积百分比含量，设计了非均质材料实体 CAD 模型。该方法中材料合成函数的系数由边界条件确定。例如对图 6.18-7 所示的圆筒进行材料设计：

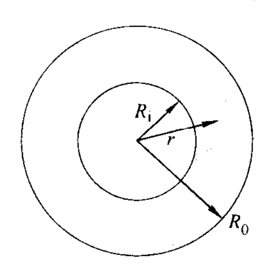


图 6.18-7 圆筒的材料设计

材料合成函数 V_m 为以半径 r 为参数的二次多项式函数：

$$V_m = a_0 + a_1 r + a_2 r^2$$

边界条件：

$$V_m = \begin{cases} 0 & r = R_i \text{（圆筒内壁没有该材料 } m\text{）} \\ 1 & r = R_0 \text{（圆筒外壁全为该材料 } m\text{）} \end{cases}$$

由此可得：

$$V_m(r) = \left(\frac{a_1 R_0 R_i (R_i - R_0) - R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \right) + a_1 r + \left(\frac{1 - a_1 (R_0 - R_i)}{R_0^2 - R_i^2} \right) r^2$$

该方法在控制粒度上是全局，在描述手段上采用函数，与流行 CAD 系统没有耦合关系，是一个单独系统，可应用于分层制造，如 DMD，也可用于有限元热和应力分析。

使用这种全局函数描述材料组成，只能用于简单规则的形体，对于复杂非均质材料实体的建模还存在一些问题：需要选择合适的材料合成函数，边界条件难确定，最优系数难以获取，如上式中系数还需要进一步确定。

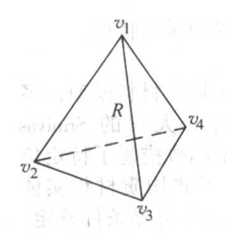
2.1.2 局部函数材料合成

此种方法将实体分为若干个子区域，通过局部函数描述该子区域对应的非均质材料模型。这类方法的典型代表是 MIT 的 T. R. Jackson 等人提出的 LCC（local composition control）的方法。该方法通过 CAD 系统的网格划分功能，将实体划分成许多子区域——材料四面体单元，每个四面体单元对应一组材料合成解析函数，四面体单元内每一点的材料组成与子区域的各顶点的材料组成以及 Bernstein 多项式函数有关，而四面体单元顶点的材料组成是到模型边框的距离的函数。

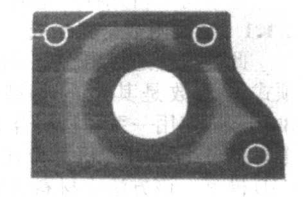
图 6.18-8 为 LCC 建模示意图，图 6.18-8a 为顶点为 v_1、v_2、v_3、v_4 的材料四面体单元，相应的子区域为 R，图 6.18-8b 为 LCC 建立的注塑模具的一个分层面材料组成图，图中不同的灰度表示了材料的不同组成。

该方法在控制粒度上是局部控制，在描述手段上是函数，与流行商业 CAD 系统存在数据交换，是弱耦合关系，仅可应用于 3DP 工艺。

LCC 的优点是：充分利用了 CAD 系统的能力，从而完成了划分材料四面体单元这一复杂任务；对于材料组分的控制较为精细；按照 Bernstein 函数计算四面体单元内某点的材料向量后，可直接使用 3DP 工艺加以成形实现。



(a) 材料四面体单元



(b) 注塑模具

图 6.18-8　LCC 模型

但是 LCC 也有其缺点：必须借助于 CAD 系统划分材料四面体单元，对于反求工程结果数据不能使用；模型过于复杂，处理的效率低，存储空间大，一般情况下并不必要；仅适合于逐点喷射的 RP 工艺，对于微流连续挤出工艺如低温沉积制造，很难使用。

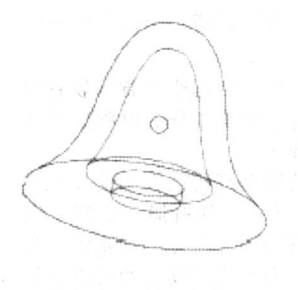
2.1.3　材料区域指定

此种方法首先将实体从结构上分为几个相连的区域，可以借助 CAD 系统建模功能，然后在每一区域内人为指定其材料组成。香港大学的 W.K.Chiu 和 S.T.Tan 在 CAD 系统中使用了这种方法。采用了材料树的层次嵌套结构，用于处理材料信息。修改了 STL 文件为嵌套结构，可提供快速成形的数据接口。

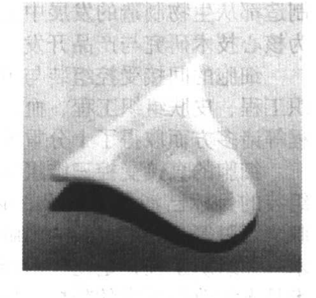
图 6.18-9 为材料树嵌套模型的示例，图 6.18-9a 为在 CAD 系统（UG）中建立的钟几何模型，图 6.18-9b 为 FDM 工艺制备的钟试样。

该方法在控制粒度上是局部控制，在描述手段上是材料指定，完全在 CAD 系统上开发，存在强耦合关系，可应用于分层制造，如 FDM。

该材料树嵌套模型的优点是，原理简单，实现容易，采用修改后的嵌套 STL 模型，能适应多种快速成形技术。缺点是必须在 CAD 系统上建模并二次开发，不能使用反求结果数据，材料不能平滑过渡。



(a) 钟的CAD模型



(b) FDM工艺成形的钟

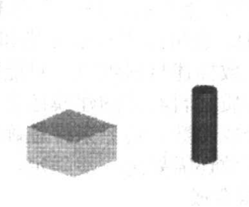
图 6.18-9　材料树嵌套模型

2.1.4　材料单元运算

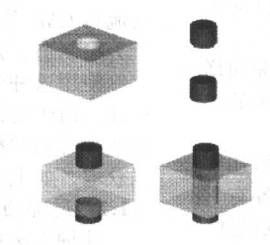
材料单元运算在控制粒度上是局部控制，在描述手段上是材料运算，一般依托于某种流行商业 CAD 系统，是强耦合关系，可与有限元系统无缝集成，适合于进行有限元分析。

材料单元运算类建模方法以 Dutta 和 W.Sun & Feng Lin 的两种方法为例。Dutta 提出了一种多材料实体的建模方法，将实体分解为多个单元，每个单元包含一种材料，通过传统几何布尔运算和新的操作对多材料模型进行处理；W.Sun 和 Feng Lin 等人提出了基于 CAD 系统的复合材料元胞的设计和构造方法，通过 Reasoning Boolean Operation 的合成和提取操作构造非均质材料结构。

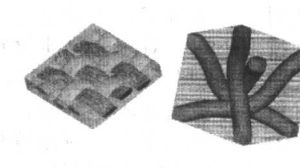
图 6.18-10 为复合材料元胞方法示意图，图 6.18-10a 为两种材料单元：方块和圆柱，图 6.18-10b 为材料单元的几种运算结果，图 6.18-10c 为采用复合材料元胞方法建立的两种复合材料模型：二维纺织纤维和三维三轴辫。



(a) 两种材料单元



(b) 几种运算示例
依次为A-B, B-A,
A+(B-A),B+(A-B)



(c) 两种复合材料模型
(二维纺织纤维和三维
三轴辫)

图 6.18-10　复合材料元胞设计方法

复合材料的元胞设计方法很好地借助 CAD 系统的建模功能和实体运算功能，由于具有多种材料单元运算能力，可以比材料指定方式获得更多的材料控制的能力。但是其描述的材料之间有明显的边界，不能平滑过渡，而且由于需要与 CAD 系统进行无缝集成，存在强耦合关系，难于使用反求数据模型，也不容易与快速成形技术接口。

2.1.5　梯度结构模型

复杂组织和器官的设计与制造要求数字模型不仅能够较好地描述组织或器官的几何形状，还要能够描述组织或器官中结构和材料的梯度变化。采用传统几何模型或分析模型描述方法很难实现结构和材料梯度变化的描述，因此必须建立新模型描述方法。为此，清华大学激光快速成形中心提出了新的模型描述方法——组织工程支架的梯度结构模型。这一模型将在下节中具体论述。

2.2　组织工程支架的梯度结构模型

2.2.1　模型原理

前已叙及，传统的非快速成形支架制备技术基本不存在建模，其制备的支架或支架材料的特点依赖于其自身的工艺能力，对支架的三维形状、材料组成和孔隙率，缺乏精细控制或完全不可控。而现有的非均质材料实体模型都存在一定缺点，并且不是针对 LDM 工艺设计，因而不能采用。

使用区域和模板描述支架梯度结构模型，可望满足以上设计目标和特点。区域和模板的使用如图 6.18-11 所示，图中区域 R_1 和 R_2 分别使用模板 1 和 2。

区域是一个几何上连续的有界空间。如图 6.18-11 是两个区域。区域具有以下性质：

1）区域是有界的；



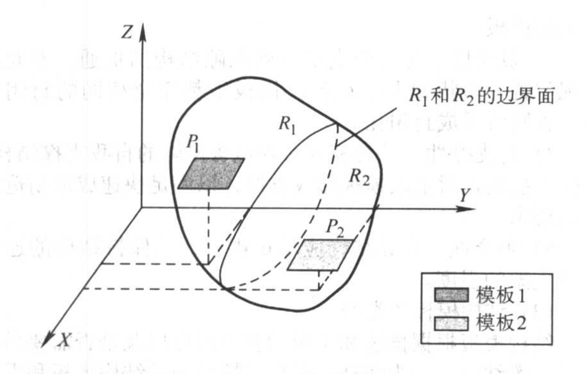


图 6.18-11　区域与模板的使用

2）区域之间可以存在边界，如图 6.18-11R_1 和 R_2 的边界面；

3）区域之间不存在干涉，没有公共的空间；

4）区域内各处的材料组成和孔结构相同。

模板是指可重复使用的材料和/或结构分布的样式，也就是规律性。如图 6.18-11 使用了 1 和 2 两个模板。模板具有以下性质：

1）模板一般有尺度。如长度和宽度等；

2）模板可以是表示的最小单元，但不一定必须是；

3）模板是可定位的。一般以坐标轴的原点或区域包围盒的某个顶点作为定位基准，根据区域内某点的坐标确定其在模板中适用的位置；

4）模板可分层次，比如描述材料组分的底层模板，和描述结构分布的上层模板，分层次的模板嵌套使用。

区域和模板描述方式支架梯度结构模型的设计目标：

1）为适应多种数据来源，采用类似于 STL 模型的实体三角面边界表示方式描述区域，但 STL 只能描述一个实体，对于多个区域尤其是有共同边界的区域难以表示，因此需要将 STL 模型加以扩展，本文采用的 XTL 即为 STL 的扩展模型；

2）为了分别对材料和结构进行控制，在各区域内采用两种不同层次的模板——材料模板（底层）和结构模板（上层），将复杂的控制问题简单化；

3）建模过程中的材料设计函数，孔隙率设计函数等设计进程信息作为区域的属性，同时被保存到相关的区域中，因而设计进程得到支持；

4）为了与 LDM 工艺衔接，材料模板和结构模板可以很方便地应用于接口技术，生成各分层面的扫描路径。

区域和模板描述方式支架梯度结构模型的特点：

1）因为支架内的区域是通过函数设计和区域分割的方法得到的，且各区域内的材料组成相同，所以，在描述手段上，区域间的材料组成的变化体现了函数描述的手段，区域内材料组成的不变化则体现了材料指定的手段。因而在描述手段上体现了函数描述与材料指定相结合；

2）采用了区域描述方式，在控制粒度上属于局部控制；

3）不依赖于 CAD 系统，与 CAD 系统是弱耦合关系。

可见，基于“区域-模板”的原理可以描述支架的梯度结构模型。

2.2.2　支架的材料描述模型——材料模板

（1）材料模板的定义和性质

材料模板表示作用在某一区域内的材料分布规律，离散的材料单元按该规律集合在一起，组成一个更大的材料单元。一个特定的区域内对应同一个材料模板。如果各区域使用的材料模板不同，某组成材料在不同区域的含量将可能不同，从而使支架的各区域之间呈现出材料的梯度分布。

材料模板是通过一个材料序列来定义的，如图 6.18-12 所示。

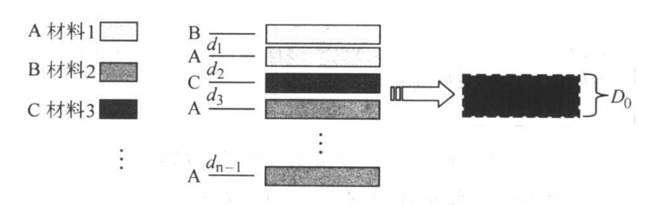


图 6.18-12　材料模板的定义

材料模板可视为一个复合材料单元，如图 6.18-12 中右侧虚线所示。

预先假设材料模板中材料种类共有 m 种，一共有 n 条，各材料喷出时截面呈圆形，其直径分别为 D_i，$i=1,2,\cdots,m$，在材料模板中出现次数为 N_i，$i=1,2,\cdots,m$，材料中心的间距为 d_j，$j=1,2,\cdots,n-1$，第 j 条材料的种类编号为 m_j，$j=1,2,\cdots,n$，则有

$$n=\sum_{i=1}^{m}N_i$$

特别地，当只有一种材料，且出现次数为 1 时，$n=1$，复合材料实际上就是单一材料。这种情况不包括在以下的讨论中。

复合材料单元类似于普通单一材料，但具有更多的性质。

1）宽度　材料从喷头喷出时呈丝状，截面是圆形，尺寸用直径来表示。对于复合材料单元，则是一系列的丝材的排列，尺寸用宽度来表示。计算可得，复合材料单元的宽度为：

$$D_0=\sum_{j=1}^{n-1}d_j+(D_{m_1}+D_{m_n})/2$$

2）材料组成　材料组成是模板中材料的体积占模板所有支架材料总体积（不包括空隙）的百分比。对于第 i 种材料，其体积百分比含量 V_i 为：

$$V_i=\frac{N_i\pi D_i^2/4}{\sum_{i=1}^{m}(N_i\pi D_i^2/4)}=\frac{N_iD_i^2}{\sum_{i=1}^{m}(N_iD_i^2)}$$

3）孔隙率　由于选用材料 D_i 和设计间距 d_j 的不同，材料模板表示的复合材料单元通常具有一定的孔隙率。考虑到材料挤出成形后由于重力作用变得扁平，孔隙率可以近似为理论上的截面孔隙面积与总截面面积的比。可得：

$$\varepsilon_0=1-\frac{\sum_{i=1}^{m}(D_iN_i)}{D_0}$$

如图 6.18-13 所示为含有两种材料组分的三个不同的材料模板的示例。模板 1 和模板 3 中材料成分都是 66.7%的 A 和 33.3%的 B，只是材料排列的方式有所不同，而模板 2 中材料成分则为 33.3%的 A 和 66.7%的 B。三个材料模板的孔隙率都为 50%。

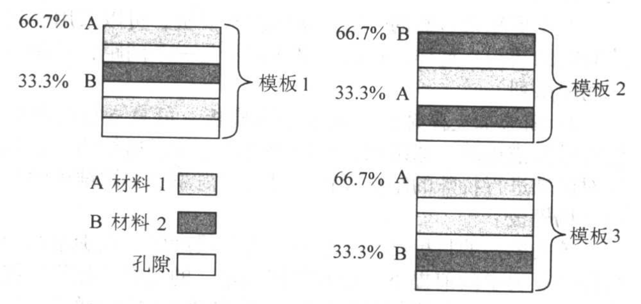


图 6.18-13　三种不同的材料模板

材料模板的 BNF 格式定义如图 6.18-14 所示。

<材料模板>::=<孔隙率><宽度><材料排布1>…<材料排布n>
<材料排布>::=<材料标识><间距>

图 6.18-14　材料模板的 BNF 格式定义

2.2.3　支架的结构描述模型——结构模板

（1）结构模板的定义

结构模板用于描述支架内部结构的变化规律，和材料模板一样，某一个特定的区域内对应同一个结构模板。

结构模板是作用在某一区域内的结构分布规律，描述了材料模板所表示的复合材料单元在三维空间中的排布方式，决定了支架在该区域内的内部孔隙形态和尺寸。

可见，材料模板和结构模板是结合使用的，结构模板中的材料正是材料模板表示的复合材料单元。通过结合使用分层模板的方式，材料和结构分别得到控制。

（2）结构模板的特点

结构模板具有以下特点。

1）分层性　遵循分层制造的思想，结构模板是一套分层模板。每一层模板只描述了一个二维分层面结构，都是一种二维模板。在一层模板中不允许出现路径相交（不包含端点在路径中间）的情况。一套多层模板，通过单层模板的叠加，可描述多个相邻分层面内的结构，是一种三维模板。

2）叠加性　不同的结构模板可以叠加在一起，从而形成新的结构模板。例如，两种结构的模板叠加得到交替变化结构的模板。

3）贯通性　为保证支架三维孔隙结构的贯通，不允许出现位置、形状和大小在各层模板中都完全相同的封闭区域，否则将形成封闭孔。

4）自支撑性　每套模板必须包含足够的自我支撑结构，以便下层模板对上层模板形成支撑，以满足快速成形制造的工艺要求。

5）耦合性　边界结构应尽量耦合，以保持结构的连贯性和支架的强度。

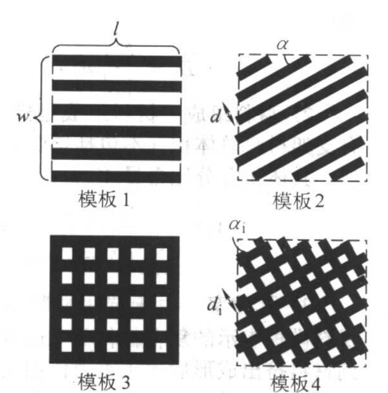
（3）结构模板的类型

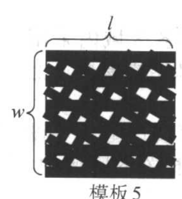
结构模板根据描述和实现的复杂程度以及是否需要另行设计支撑结构，分为两种：可自支撑的简单结构模板和需添加支撑结构的复杂结构模板。

1）可自支撑的简单结构模板　在该类模板描述的结构中，下层模板对上层模板形成自然支撑，不需要另外添加支撑，结构相对简单。可自支撑的简单结构模板比如典型的快速成形填充网格结构——十字网格，或是倾斜一定角度的交叉网格。由于相邻两层模板的倾斜角度不同，因此下一层可以对上一层形成支撑，使上层结构在成形过程中不至于坍塌。

可自支撑的简单结构模板如图 6.18-15 所示。图中分别给出了单层模板和多层模板的示例。

单层模板用一组等间距的平行线来描述。单层模板的特征用四个参数描述：长度 l、宽度 w、线间距 d 和倾斜角度 σ。约定模板中的第一条路径从模板的左上顶点开始。图 6.18-15 中的模板 1 和 2 为两种倾斜角度的单层模板。





A 单层模板
（特征：l, w, d, 和α）

B 多层模板
（特征：l, w, d, d_i 和α_i）

图 6.18-15　可自支撑的简单结构模板

多层模板是多个单层模板的叠加，形成了三维结构。多层模板的特征用一系列的单层模板特征来描述：线间距 d_i 和倾斜角度 σ_i，另外还有模板的长度 l、宽度 w 和各层模板间的间距 h。为了便于模型输出 CLI 模型，h 与分层的层厚相等。图 6.18-16 中的模板 3 为两层的十字网格模板，模板 4 为有一定倾斜角度的二层模板，模板 5 为有一定倾斜角度的三层模板。

对于更复杂一些的单层和多层结构模板，可以采用变化线间距的结构，这样，特征的描述将不是一个间距，而是一个间距系列。

2）需添加支撑结构的复杂结构模板　可自支撑的简单结构模板描述的孔隙结构是比较规则的三维贯通结构，如果要对区域进行特殊的结构设计，可采用需添加支撑结构的复杂结构模板。

该类模板的目标结构是任意形态和尺度的，在满足结构模板特征要求的前提下，没有任何预定义的规则，往往不能实现自支撑，需要添加支撑结构。对这种结构模板的定义，用一系列线段来表示。如图 6.18-16 为需添加支撑结构的复杂结构模板示意图。

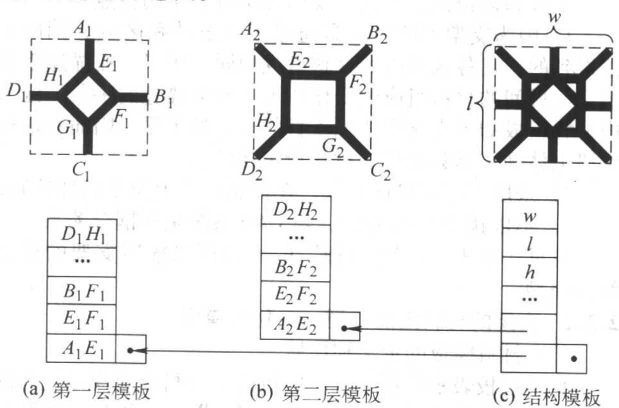


图 6.18-16　需添加支撑结构的复杂结构模板

如图 6.18-16 给出了复杂结构模板的描述方法。图 6.18-16c 为两层结构模板，由第一层模板图 6.18-16a 和第二层模板图 6.18-16b 构成，则对于模板图 6.18-16c 的描述，不仅包



括模板自身的属性，如长度 l 和宽度 w 等，还包括各层模板的具体描述，其第一层模板包括 A_1E_1，E_1F_1，B_1F_1，…，D_1H_1 共 8 条路径，其第二层模板包括 A_2E_2，E_2F_2，B_2F_2，…，D_2H_2 共 8 条路径。

(4) 结构模板的格式定义

结构模板的 BNF 格式定义如图 6.18-17 所示。

图中的类型为 1 时模板是简单结构模板，为 2 时是复杂结构模板。结构排布 i 是指第 i 层结构模板，其中参数的含义是：当类型为 1 时，$m=3$，这三个参数分别是路径的间距、倾斜角度和该层模板的孔隙率；当类型为 2 时，$m=4k+1$，其中 k 是路径的条数，前 $4k$ 个参数为路径的起点和终点的 xy 坐标，最后一个参数是该层模板的孔隙率。

〈结构模板〉::=〈类型〉〈长度〉〈宽度〉〈孔隙率〉〈结构排布 1〉…〈结构排布 n〉
〈结构排布〉::=〈参数 1〉〈参数 2〉…〈参数 m〉

图 6.18-17　结构模板的格式定义

2.3　模型的应用

根据所描述的对象和用途不同，生物医学数字模型可分为以下几类。

1) 用于计算和分析的生物组织或器官的数字模型　建立该类模型的目的是为了对生物组织或器官，或用于对与该组织或器官相关的疾病治疗的器械进行数值计算或分析，通常是采用有限元法对结构和其力学性能进行分析，因而此类模型必须能够较好地分辨所涉及的不同组织，如骨、肌肉、黏膜等；另一方面，由于生物组织和器官存在着个体差异，而分析结果通常需要在一定范围内外延，因而其模型的精度无需很高。除几何模型外，模型中还应包括不同组织的性能参数、工作状态下的约束与边界条件等。近年来应用较多的此类模型包括牙和牙周组织有限元模型、复杂结构骨的有限元计算模型等。

2) 用于器械或实物模型制造的生物组织和器官数字模型　用于器械或实物模型制造的生物组织和器官通常不需要分辨组织或器官内部不同的部分和组织，但对外形的尺寸精度要求较高，尤其在用于器械制造时，对精度的要求尤其严格。

上述两类模型均可采用现有的数字模型文件格式。

3) 用于复杂组织器官的设计和制造用数字模型——XTL 模型　复杂组织和器官的设计与制造要求数字模型不仅能够较好地描述组织或器官的拓扑结构和几何形状，还要能够描述组织或器官中结构和材料的梯度变化。采用传统几何模型或分析模型描述方法很难实现结构和材料梯度变化的描述，因此必须建立新模型描述方法。为此，清华大学激光快速成形中心提出了新的模型描述方法——XTL 模型。

4) 假体的建模　用于驱动快速成形设备进行假体成形的数据来源于患者自身，通过反求和必要的设计得到三维数学模型，这样最终成形的结果才能够与患者形体和健康组织器官匹配。

2.3.1　用于计算和分析的模型

用于分析的生医模型的建立包括组织器官几何模型的建立、材料本构关系和载荷与约束的描述。由于此类模型需要区分各种不同的组织，因而其中几何模型的建立最为困难。

1) 组织器官几何模型的建立　用于分析的组织和器官几何模型中，必须能够清晰地区分出各种组织，能够满足这一要求的方法有两种：CT/MRI 断层图像三维重构和数字化人体切片图像的三维重构。后者的图像为断面彩色图像，图像处理上较难区分不同的组织。因此，通常采用 CT/MRI 图像三维重构的方法获取组织和器官的几何模型。

由于目前 CT/MRI 分辨能力的限制和某些组织的结构和几何尺寸的特殊性，为了获得较为可信的几何模型，多数情况下还需要根据这些组织的结构和尺寸的解剖学数据以及各种组织的解剖学邻接关系，对几何模型进行处理。通常模型的建立过程如图 6.18-18 所示，包括 CT/MRI 断层图像的预处理、易识别组织的三维 Brep（边界表示）模型的建立、引入解剖学关系确定难识别组织的 Brep 模型，以及采用有限元等数值分析软件的前处理功能建立三维体素模型，最终获得可供分析的所有相关组织的三维体素模型。

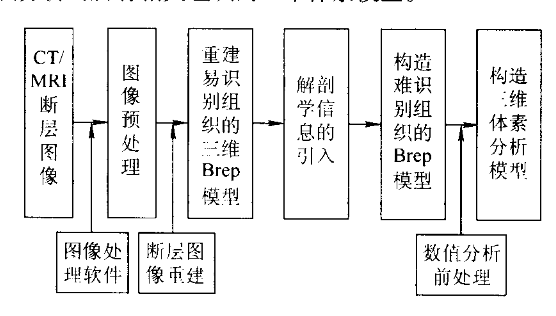


图 6.18-18　生物医学有限元模型的几何模型建立过程

采用这种方法建立的组织和器官的数字几何模型，可较为准确描述具有多种组织的复杂生物组织或器官，且相邻各组织的几何匹配关系好，不会发生较大的互相干涉或分离，所存在的较小尺度的几何干涉也可以通过数值方法来消除。

需要说明的是，解剖学信息的引入通常是采用三维 Brep 模型的变形处理和几何体布尔运算的方法来实现。

2) 相关组织的力学本构关系的确定　作为分析用生物组织和器官的模型，必须包含相关组织的力学本构关系。由于绝大多数生物组织都是各向异性和非均质性的非线性材料，且其性能存在着因人而异的个体差异，目前尚不能准确确定其力学本构关系。大量的研究显示，在生物组织的分析计算中，对所涉及材料进行均匀、弹性、线性的简化，不仅不会对分析计算结果的可信度与可靠性产生明显影响，而且可以大大节省计算成本，因此，通常对所涉及组织的力学本构关系做了如下简化：①各向同性；②线弹性；③组织内部均匀、连续。

3) 约束与边界条件的确定　由于生物组织和器官的结构和几何特征极为复杂且不规则，其约束与边界条件也较为复杂，通常需根据实际分析的要求对其进行必要和合理的简化。

2.3.2　用于器械或模型制造的数字模型的建立

用于器械或模型制造的生物组织或器官的数字模型建立方法，常先采用反求工程数据测量的方法获取模型的原始几何信息，然后再采用三维反求软件重建其三维几何模型用于成形加工，其关键点是原始几何信息的获取方法。常用的原始几何信息测量方法见第 3 章。

2.3.3　用于复杂组织器官设计和制造的数字模型的建立方法

复杂组织和器官的设计与制造中需要的数字模型，不仅需要描述组织或器官复杂的空间几何形状，而且需要描述组织或器官中不同部分所具有的不同细微结构、材料构成等。采用上述两类模型的建立和表示方法是很难实现这一目的的。

复合材料实体建模技术多种多样，其描述手段、控制粒度、与 CAD 系统耦合关系、应用背景各有特点：从描述手段上来说，可分为函数描述与非函数描述，其中非函数描述又可分为材料指定与材料运算；从控制粒度上来说，分为全局控制和局部控制；从与 CAD 系统耦合关系来说，分为强



耦合（无缝集成）和弱耦合（数据交换）；从应用背景来说，包括了 DMD、FDM、3DP 等快速成形工艺和有限元分析。

复杂组织和器官的建模是复合材料实体建模的一个新的应用方向，应主要着眼于以下目标。

1）适应多种数据来源　与主要数据来源反求工程和 CAD 系统能够进行数据交换，初始数据源采用 STL 模型标准。

2）支持材料和孔隙率的精细控制　不同组织和部位的支架由于材料降解特性和支撑强度的不同，即使是在同一个支架内部，都可能要求有不同的材料和结构梯度，因此需要对材料和孔隙率进行精细控制。

3）输出与快速成形系统接口　支架建模的结果直接应用于快速成形制造，其输出结果仍应采用 CLI 模型。

现有的复合材料建模技术没有一种能够同时满足上述建模要求。

结合现有复合材料建模技术方法的优缺点，复杂组织和器官的建模方法具有以下特征。

1）在描述手段上是函数描述与材料指定相结合，函数描述用于提供精细控制，通过材料设计来进行，而材料指定是通过材料函数的结果进行，这样即减少设计强度，同时兼顾了材料控制。

2）在控制粒度上采用局部控制，通过划分一系列的材料 - 结构区域指定其材料和内部结构。

3）与 CAD 系统关系是弱耦合关系，同时根据需要开发一些简单 CAD 功能以支持设计任务。

4）与快速成形工艺接口，建模的最终目的是组织和器官结构的制备，所以必然要与快速成形系统接口。

复合材料建模方法分析与比较如表 6.18-1 所示。

表 6.18-1　复合材料建模方法技术分析

<table>
<tr><th rowspan="3">方法</th><th colspan="3">描述手段</th><th colspan="2">控制粒度</th><th colspan="2">与 CAD 系统关系</th><th colspan="2">应用</th><th colspan="6">建模要求</th></tr>
<tr><th rowspan="2">函数</th><th colspan="2">非函数</th><th rowspan="2">全局</th><th rowspan="2">局部</th><th rowspan="2">强耦合</th><th rowspan="2">弱耦合</th><th rowspan="2">快速成形</th><th rowspan="2">有限元分析</th><th colspan="2">适应多种数据来源</th><th rowspan="2">支持材料精细控制</th><th colspan="3">输出与 RPMS 接口</th></tr>
<tr><th>指定</th><th>运算</th><th>反求</th><th>CAD</th><th>DMD</th><th>3DP</th><th>MEM</th></tr>
<tr><td>全局函数材料合成</td><td>Y</td><td></td><td></td><td>Y</td><td></td><td></td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td colspan="2"></td><td></td><td>Y</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>局部函数材料合成</td><td>Y</td><td></td><td></td><td></td><td>Y</td><td></td><td>Y</td><td>Y</td><td></td><td colspan="2">Y</td><td>Y</td><td></td><td>Y</td><td></td></tr>
<tr><td>材料区域指定</td><td></td><td>Y</td><td></td><td></td><td>Y</td><td>Y</td><td></td><td>Y</td><td></td><td colspan="2">Y</td><td></td><td></td><td></td><td>Y</td></tr>
<tr><td>材料单元运算</td><td></td><td></td><td>Y</td><td></td><td>Y</td><td>Y</td><td></td><td></td><td>Y</td><td colspan="2">Y</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>组织或器官的复杂细微结构材料梯度结构建模方法</td><td>Y</td><td>Y</td><td></td><td></td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td></td><td>Y</td><td colspan="2">Y</td><td>Y</td><td></td><td></td><td>Y</td></tr>
</table>

复杂组织和器官的制造多采用类似于 FDM 或 MEM 的快速成形工艺，其特点是组织或器官的支架或结构是由扫描路径逐条堆积而成的。在这种情况下，材料的复合表现为与众不同的方式，而组织或器官的支架或结构的制造也可视为一系列离散扫描路径的集合，这种成形特点决定了它尤其适合于组织或器官的复杂细微结构。同时，建模要求也不仅仅只限于多种材料的使用，而且也包括组织或器官的复杂细微结构的构造，而这种细微结构是不能在已有的 CAD 系统中得到的。通过结构设计则可以有效地解决这个问题。

组织或器官的复杂细微结构材料梯度结构建模方法的基本思想是：按照组织或器官设计的目标，根据不同部位的不同结构和功能要求，选取特征元素（如点、线、面），进行基于特征的材料设计和结构设计，通过函数描述的方式确定距离特征某一距离的位置的材料组分和内部细微结构；在此基础上将组织或器官划分成若干个彼此邻接而互不相交的区域——材料-结构区域，每区域内任意位置到特征的距离在某一设定的区间，因此可以按照材料函数指定其组分，按照结构函数指定其细微结构；然后根据组分和细微结构设计相应的材料模板和结构模板；在分层处理后对每一材料-结构区域，先采用材料模板对结构模板进行材料填充，再采用结构模板进行结构填充。

由于此种建模方法是基于快速成形技术基础之上，组织或器官的制造由多喷头生物快速成形系统来完成，为了保持整个组织或器官制造数据处理流程的连贯性和方便性，仍采用快速成形系统的准工业标准 STL 模型作为组织或器官建模的数据源，而且，为了与快速成形系统数据接口保持一致，仍采用 CLI 文件作为材料梯度结构的描述模型，CLI 文件标准中的 ID 在此处不再标识不同的零件，而是标识不同的材料。同时，作为系统输入的还有材料库和结构库，使用材料库，在各材料-结构区域内，根据材料成分设计材料模板；使用结构库，在各材料-结构区域内，根据细微结构设计结构模板。分层后先采用材料模板对结构模板进行材料填充，再采用结构模板进行结构填充，建立起组织或器官细微结构材料梯度结构的数据模型。组织或器官细微结构材料梯度结构的建模方法如图 6.18-19 所示。

这种建模方法的优点在于：

1）可以使用多种数据来源，尤其是支持反求数据，这符合组织和器官模型往往由医学解剖学数据重建的实际情况；

2）通过特征的作用区域的划分可以对组织和器官的局部进行分区精细控制，同时没有引入局部控制带来的模型描述上的复杂性；

3）通过特征的选取和函数描述的方式可以对某一选定区域进行良好的设计，支持材料的平滑过渡；



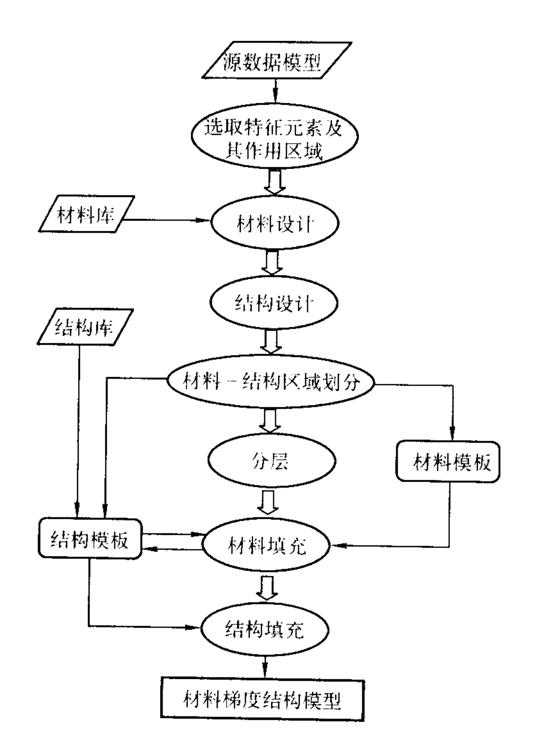


图 6.18-19 组织或器官的复杂细微结构材料梯度结构建模方法

4）建模结果可直接用于快速成形工艺成形。

2.3.4 假体的建模

1）骨组织建模　像骨盆、颅骨和牙齿等硬组织在 CT 图像上有很好的灰度对比度。因此，这类硬组织建模通常采用 CT 层片图像。在获取 CT 层片图像的时候，可以根据硬组织形状复杂程度，选择合适的层厚。经过逆向工程得到组织的三维数字模型。对于缺损的硬组织，需要进行必要的设计、镜像等操作，得到修复的数字模型。

2）软组织建模　皮肤、肌肉已经软骨等软组织的密度大大低于骨骼等硬组织。在 CT 图像上的灰度对比很小，甚至难以区分。因此，可以选择 MRI 图像作为数据来源。MRI 图像能够较好地显示软组织的灰度级别。但是由于 MRI 扫描费用较高，在最终产品精度要求不高、操作者拥有丰富经验的情况下，也可以采用 CT 图像，以降低建模成本。

3 器官假体的快速制造

器官假体可分为具有生物修复功能的可植入假体（器件）和作为器官模型的体外假体。

3.1 假体的医学价值

3.1.1 体外假体

作为人体器官假体的一种，体外假体是一种不具备生物相容性的、不植入体内的假体。它具备准确的几何形状和解剖结构，甚至模拟器官的颜色、质感和密度等物理性能，在医学上有重要的作用。

1）辅助诊断　采用快速成形技术制作的体外假体，是可以触摸和操作的与患者器官具有完全相同的形状的物理模型。医生可以根据这个物理模型进行诊断，判断病灶部位和侵润情况。该模型是对于生化等检测数据的必要的、直观的补充。

2）手术规划　体外模型由于明确地显示了患病器官的空间结构和病灶的位置，医生可以根据该模型进行手术部位和切口尺寸设计，比二维 CT 图片和软件重构数学模型更直观、更方便。

3）医患交流　可触摸的物理模型，对于医生和患者来说，都是可以很方便观察和研究的。因此，具备患者器官几何信息和部分病理信息的物理模型，是医患沟通的理想桥梁。它可以让患者在手术之前就了解到自己的病灶部位，哪些是需要切除的，哪些是可以保留的，大大提高手术和治疗方案的透明度，减少医疗纠纷。

4）辅助手术　对于整形、人工假体植入等手术，体外假体可以起到很好的辅助作用。例如清华大学生物制造中心采用 SSM 工艺，以涂敷纸为原料为北京大学医院制作的骨盆，由于具备准确的解剖关系，医生以该骨盆为模具，设计了钛合金人工半骨盆置换的钛合金修复器件，并为该器件的连接爪的走向和固定确定了方位。避免了在患者病灶部位进行比对和修正的操作，大大缩短手术时间，提高置换和连接精度。缩短了患者卧床休息的时间，保留了患者全部的运动功能。

3.1.2 植入假体

植入假体是采用可植入人体的生物相容性材料制作的修复器件。因此，除了具备可触摸和可操作性外，能够被人体所接受，实现基本的修复功能。

1）功能恢复　目前，许多人体器官已经实现了人工置换，置换的人体器官部分地或者全部地实现了健康天然器官的功能。如人工血管、人工心脏和人工喉等。这些人工器官为提高患者的生存质量，延长患者的生命，起到了很好的作用。

2）外观修复　对于起外观支撑作用的组织器官损伤，人工植入物能够很好地实现修复功能。如颅骨修复、下颌骨修复等。不仅恢复了对内部组织保护功能，而且重建了健康的结构和外观，恢复了患者的自信。

3.2 假体材料

目前应用于临床的医用材料很多，从金属到非金属，从有机材料到无机材料，已经形成了一个庞大的体系。

3.2.1 金属与合金

金属类材料是开发应用最早的种植材料之一。由于它具有理想的机械强度和生物相容性，加之加工工艺的不断提高完善，不少金属或合金材料至今仍为诸多种植学专家们所推崇和青睐。作为种植材料，对金属有如下要求：优良的耐腐蚀性，无毒、副作用，组织相容性好，适宜的力学性能，耐磨、坚固，合理的价格。

1）金　金可以认为是最早的生物材料之一。早在 1565 年，Petronius 便采用金作为骨代用品，无论在动物实验条件下，还是细胞学筛选实验乃至最终用于人体，金都显示其无比优良的生物相容性。这与金的化学惰性以及无毒性分不开。此外，金的延伸性极好，至今，许多高级的种植体系统如 Branemark 种植体中部分配件仍采用金或铂的合金制造。

2）316L 不锈钢（铁-铬-镍合金）　不锈钢应用于骨代用品的历史可以追溯到 1912 年。不锈钢是铁基耐蚀合金。金相组织为奥氏体（Austenitic）。目前应用最多的 316L 不锈钢含铬 18%～19%，镍 14%～15%，钼 3%，锰 0～2%，硅 0～0.75%，铜 0～0.1%，碳 0.03%～0.07%，其余为铁。平均电化学价约为 2.7。316L 不锈钢的硬度低（维氏硬度 165），表面易于压痕，极限抗拉（张）强度、屈服强度和疲劳强度均低，易于变形或折断。但它也有再钝化性能优良，腐蚀率低，生物适应性较好和经济便宜等优点。所以目前尚有一些种植系统如 Vitreous Carbon 种植体和穿下颌骨种植体的一部分仍采用不锈钢作核心，外面为纯碳或羟基磷灰石涂层。

3）铸造钴铬钼合金　该合金起用于 1936 年，是钴基耐蚀合金，商标名为 Vitallium，又可简称为铸钴合金（以区别于锻钴合金）。含铬 28%，钼 6%，镍 2%～2.5%，铁 0～



1%，硅0~1%，锰0~1%，碳0~0.25%，其余是钴。平均电化学价为2.4。钴基合金的硬度、极限抗拉（张）强度、屈服强度和疲劳强度均高。铸钴合金的耐腐蚀性疲劳强度亦高。钴基合金的再钝化速度高，腐蚀率低。但钴基合金的毒性在体外实验中较不锈钢大，对钴过敏者可导致种植失败。目前国际上仅有少数种植体如骨膜下种植体采用铸钴合金。国内采用铸钴合金取代黄金作种植体桥架，既可降低成本，亦可取得良好效果。

4）钛及合金　钛材用于医疗领域仅有40余年的历史，1957年，Downs博士首先在矫形外科领域中应用了钛。不久，钛也成为口腔种植材料之一。钛的纯度可达99%~100%，电化学价为4.0。钛合金中除钛以外其杂质的含量为：铝6%，钒3%~4%，碳0~0.08%，铁0~0.25%。平均电化学价约为3.9。钛重量轻，弹性模量低，对振动的减幅力大，硬度、极限抗拉（张）强度、屈服强度和疲劳强度均高，其抗腐蚀性疲劳极限亦高。更主要的是钛的钝化性能极好。钝化指金属在体液中迅速氧化，在表面形成一层薄的、致密的、难溶的有晶体结构的氧化物，这层钝化膜称为氧化膜。由于氧化膜的的保护，金属继续氧化的速度减慢。也就是说，氧化膜的形成，就是金属耐腐蚀性的来源。钛形成氧化膜的速度相当快，在富氧的情况下，被破坏的氧化层会立即得到修补。这种功能是钛在电化学次序表中的位置所决定的。钛的高抗破坏能力表现在其钝化区不可能产生腐蚀。据Branemark的理论，正是由于钛表面坚固的氧化层使钛也具备了非金属的特性。因为钛－组织界面的结合是钛表面氧化层与细胞和体液间所形成的化学性结合，因而，钛具有良好的生物相容性。钴、镍、铬常常引起过敏反应，而且这些元素会在人的肝、肾和脑等器官中积累起来。

3.2.2　陶瓷

陶瓷作为口腔种植材料已有20年的历史。由于陶瓷强度较高，耐腐蚀、无毒、能很好地被口腔组织接受等特点，近几年发展很快。但陶瓷的脆性又是它的致命弱点，同样也限制了它在口腔种植领域的广泛使用。目前，生物陶瓷大体分以下三类。

1）生物惰性陶瓷　所谓生物惰性材料是指这些材料植入活体组织后没有或几乎没有组织反应，它们在体内处于稳定状态。惰性陶瓷材料包括单晶和多晶氧化铝、高密度羟基磷灰石、氧化锆、氮化硅等。

2）生物活性陶瓷　生物活性陶瓷指那些在生理环境中具有化学活性的陶瓷，它具有在组织和种植体之间刺激化学性结合的能力。这类陶瓷种植体植入后引导界面上骨组织形成的作用，因而能很快形成与骨组织的化学性结合。生物活性陶瓷包括低密度羟基磷灰石（锆－羟基磷灰石、氟－羟基磷灰石、钙－羟基磷灰石等）陶瓷、磷酸钙玻璃陶瓷、生物玻璃等。

3）生物降解性陶瓷　生物降解陶瓷指能完全被组织吸收的陶瓷材料，包括可溶性磷酸三钙、可溶性铝酸钙等。它具有更好的生物相容性。在植入体内初期，逐渐有机体组织长入。由于孔隙小，有较好的机械强度。但随着陶瓷在机体新陈代谢过程中被吸收，其强度便明显下降，最终被机体硬软组织所取代。临床常用在组织缺损时起过渡性支架或填充体的作用。

三种陶瓷材料在口腔种植方面的应用状况：由于口腔种植体需要的强度较大，氧化铝陶瓷具有一定的优势。因此，致密氧化铝陶瓷种植体已用于临床。氧化铝分单晶和多晶两类，前者的机械强度更大，但加工极为困难，同时极易污染，术前要注意严格的清洗，采用干热消毒。钙磷陶瓷具有很好的生物活性，但强度低，脆性大，易发生断裂。目前多以涂层形式出现。

陶瓷类种植材料多具有很好的生物相容性和很稳定的化学性能。在物理性能方面，它们与骨组织的弹性模量较接近而可避免界面形成过大应力。其颜色也有利于修复体恢复自然牙齿色泽。陶瓷类种植材料的主要缺点在其机械强度还不足，生物降解问题尚需长期研究。

3.2.3　碳素

碳是一种化学惰性物质，在生理环境下具有较高的稳定性，无生物降解作用。具备良好的生物相容性和物理化学性能，其弹性模量与颌骨较接近，因而能形成良好的界面。碳素材料包括玻璃碳、低温各向同性碳等。玻璃碳种植体是研制较早，应用较早的一种碳素材料。它是纯碳的一种玻璃状态物质。对碳种植体的消毒可采用蒸气高压或干热消毒。碳素类的主要缺点是颜色不美观，较脆弱，没有金属的机械变形作用，因此较易折断。

3.2.4　高分子陶瓷

高分子材料即以上两种或两种以上材料的复合，如金属表面喷涂陶瓷等。高分子材料包括丙烯酸酯类、聚四氟乙烯类、聚枫等。高分子材料的种植体弹性模量低，具有较好的骨适应性。但由于高分子化合物易老化，在体液环境中易发生不同程度的降解、造成种植最终失败。

综上所述，在诸多的种植材料中，并没有一种是完美无缺的，往往不能同时满足生物相容性和力学性能的要求。因此，复合材料的种植体应运而生。

3.2.5　复合材料

种植体复合材料包括两种主要形式。一种为混合法，如甲基丙烯酸甲酯－无机骨－发泡剂混合物。这种材料的弹性模量比金属、陶瓷等材料低、应力分布较好，缺点是疲劳强度低。复合材料目前研究应用最多的是涂层法。该方法通常以机械性能较好的金属或致密氧化铝为核心，表面多以生物相容性优良的生物玻璃或生物陶瓷涂层。但以相同材料复合的也不少，如钛芯表面钛浆涂层；致密氧化铝为核，多孔氧化铝涂层等。目的是为增加其种植体表面孔隙，从而扩大表面积，以利于骨组织生长和加强固位力。涂层技术可分为三大类，即烧结涂层、沉积涂层和喷涂法。其中又以烧结涂层和等离子喷涂两种方法应用最多。

3.3　假体快速制造

3.3.1　体外假体快速制造

复杂的矫形和器官修复手术往往要多次进行才能成功，而且矫形和修复的效果往往不够令人满意，如果有合理的体外器官模型，可以辅助医生进行手术计划改进，体外假体设计制造，术前模拟，与病患交流手术方案等。这些可以大大减轻患者的痛苦，提高治疗效果。如复杂骨外科手术，由于骨破碎产生严重位移，如没有目前物理模型的帮助，外科大夫在手术中会遇到很大的麻烦。根本搞不清楚某块碎骨是从某个创伤面而来。

国内外在这方面有很多成功的案例，有些已经进入了商业应用，如美国的Aligin公司，它利用SL（立体光刻）技术进行牙齿矫正，已经完成300万个以上的牙颌模型，成功的在美国进行实际牙矫形治疗，每年产值达数亿美元。国内清华大学联合北京大学医院，第四军医大等医疗单位，已完成十余例复杂骨科手术（骨盆，颅骨等）的体外模型，获得了良好的效果。

体外假体由于不需要植入体内，对于材料、成形环境没有特殊要求。当假体只模拟几何形状（解剖结构）时，可以选用一般快速成形材料制作。MEM工艺、SSM工艺和SL工艺均可用于体外假体的制作。

如果需要假体模拟人体器官的某些物理性能如弹性、质感等，则需要特别选择材料，并针对所选择材料开发材料送



进和成形设备。采用MEM工艺已经有了成功的弹性体快速成形实例。

3.3.2 植入假体快速制造

植入假体对于材料和工艺均有严格要求。首先，选择生物相容性材料，以避免材料在体内的排异反应和材料对人体的有害反应。其次，成形过程必须保证没有污染物的引入，即要保证洁净生产。同时，要避免成形过程对材料性能的破坏。

成形环境包括空气环境和设备接触材料的零件。空气中灰尘的个数和尺寸应该按照有关标准严格限制，避免污染材料和制品。直接接触材料的零件必须严格选材并经过必要的表面处理，在成形过程中不能有金属颗粒脱落，更不能引入重金属污染物。

3.4 假体临床应用

3.4.1 骨盆手术

骨盆手术属复杂外科手术。由于骨盆处在躯干和下肢之间的枢纽部位，兼有支持躯干、保持平衡、容纳和保护盆腔脏器以及坐、立、行等起动力和支点作用的多种功能，所以骨盆肿瘤治疗方案的选择直接关系到病人术后的活动能力，影响病人的生活质量。

以往曾对骨盆恶性肿瘤采用半侧骨盆连同患侧下肢一并切除，术后病人残废程度严重，对其生理和心理都造成不良影响。自1978年国外首次报告半骨盆内切除肿瘤、人工半骨盆置换以来，保留肢体的手术陆续被国内外所采用。目前，骨盆髋臼区肿瘤内切除后的处理方法大致有4种：

1）旷置，形成连枷髋；

2）关节固定，形成僵硬髋；

3）瘤块灭活再植或异体骨植入；

4）人工半骨盆置换。

方法1和方法2虽然保留了肢体，但骨盆和髋关节的完整性已被破坏，几乎无功能。方法3骨愈合和骨替代缓慢，植入块易坏死吸收，问题较多。方法4重建了骨盆和髋关节，保留肢体，可大部分恢复活动和负重功能，提高生活质量。该类手术国内外虽有一些报道，但总的例数不多，其中假体设计未定型及合并症较多是其主要原因。

通常，人工半骨盆假体全凭想像去做，每次手术中，所换的人工半骨盆都不适合，不是大小不对就是位置不合适，在手术中一边比画、量尺寸，一边锯掉多出来的材料，磨平高出来的表面，即使换上了也影响骨盆功能的发挥，有的还出现断裂、脱位等情况。

将患者的骨盆部位的CT图像，经数据逆向工程处理后，设计制作符合不同患者具体情况的个体化人工半骨盆假体。利用计算机技术首先制作与该患者的实体骨盆一致的模型，然后利用此模型仿生制作人工半骨盆假体。同时，利用此模型还可预先设计手术切除范围，做好术前计划，为术中骨切除的空间位置导向和假体的匹配安装提供良好帮助。该设计制作方案可为病人定制所需假体，增加精确性，减少盲目性，获得最佳的手术效果。

在骨损伤手术领域，应用快速成形技术的技术流程如下。

1）提取患处的CT或MRI图像。

2）通过专用软件，根据CT或MRI图像计算患处骨骼的三维模型。

3）用RP系统制造患处骨骼的模型。

4）医生用该模型设计手术方案，进行术前模拟等。

5）如需制造植入体，则根据患处骨骼三维模型计算出缺损部位三维模型。

6）使用生物相容性材料制造植入体。

加工流程如图6.18-20所示。

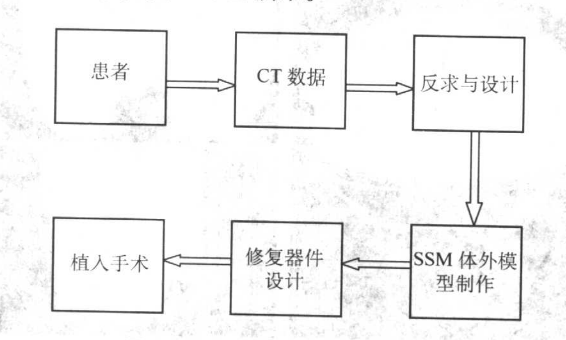


图6.18-20 骨盆修复器件加工流程

图6.18-21为正常骨盆，图6.18-22为有损伤的骨盆。由于有了患者病灶部位的模型，医生可以有效地与病人沟通，这比晦涩的二维X光照片要好理解得多，医生可以指出关键的区域，从而增加病人的理解。模型也能让医生对病人的情况一目了然，在手术之前对着模型进行手术规划，准备植入体。这样极大地减少了植入体设计的出错概率，并且这种适合每个患者解剖结构的植入体能得到一个更好的手术结果，大大缩短手术操作的时间。

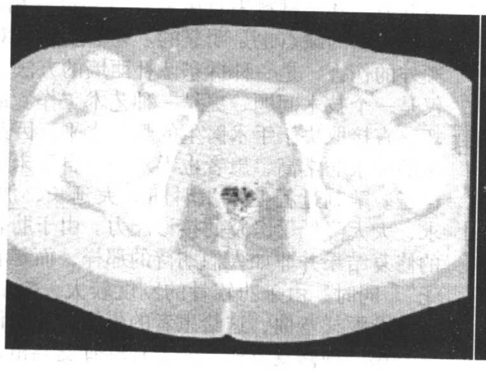
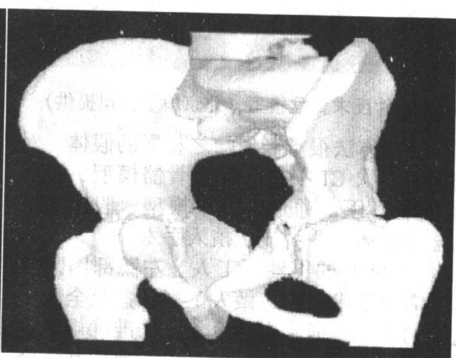



图6.18-21 从CT数据到骨骼3D数值模型（北京殷华公司提供）

从CT或MRI图像提取患者的三维模型是该流程的第一步，这一步的质量直接关系到手术的最终效果，现在有很多专业软件可以完成这项工作。由于CT图像中是以不同灰度值来表现不同的人体组织和器官，反求时必选注意选择合适的灰度，选择不当就会使模型偏离实际情况，对手术造成不利影响。图6.18-23是用Mimics软件获取的一个患者骨盆模型。

该患者左侧髋骨和腿骨连接处严重坏死，必须制作人工假体进行植入。由于该患者患病时间较长，前期靠拄拐杖保持活动，对该处造型比较大的影响，骨骼、关节位置严重变



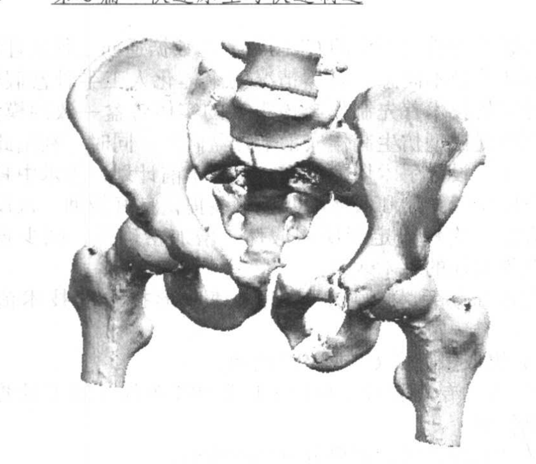
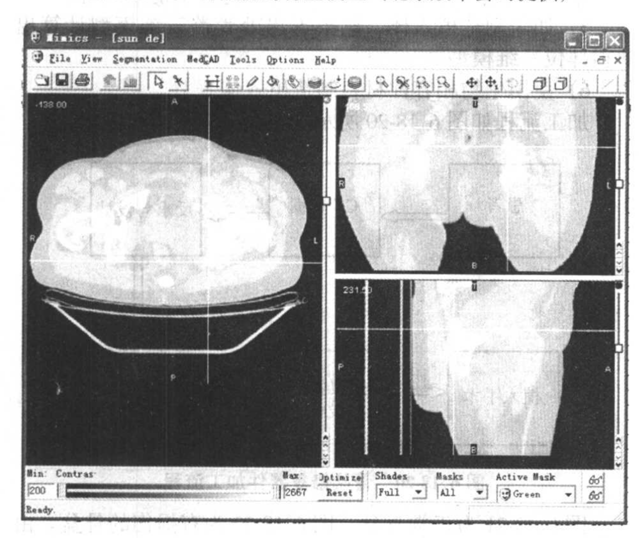


图6.18-22　有损伤的骨盆模型（北京殷华公司提供）





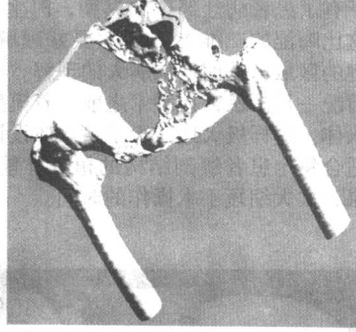


图6.18-23　用Mimics软件反求骨盆模型（北京殷华公司提供）

形，并在继续发展，传统方法很难制作与之相配的假体。对该患者在其患处进行了多次CT扫描，反求骨骼模型，制作了两个FDM工艺的盆骨模型。通过这两个模型，假体厂成功地为其制作了钛合金假体，并完成了植入手术。

案例分析　患者为49岁的男性，工人。左髋部因患肿瘤，局部骨质破坏，需要手术切除，做人工半骨盆及全髋关节置换术。以往这样的手术，通常在手术前无法准确规划手术方案，而是待手术进行中，根据切除的多少，现场制作修复件。由于是纯手工制作，其准确程度非常低，一般要一遍遍地修磨、加工，最终的假体植入物与原有骨组织的配合精度也很差，手术时间也很长。

2000年5月，医生为他做了CT，并对数据进行逆向工程，重构得到骨盆的数据模型。清华大学激光快速成形中心制作了一只与患者骨盆一样的纸质模型，这一骨盆是以涂覆纸为原材料的分层实体制造工艺逐层制作的，其加工精度为0.1 mm。

由于事先已根据模型确定了肿瘤的切除范围，结果手术过程顺利，时间大大缩短。人工半骨盆安装方便，接触好，而且稳固。利用计算机仿生技术，使我们能够针对病人的个体差异，设计制作出符合不同患者具体情况的个体化人工半骨盆。就好比“量体裁衣”，这样能使治疗获得更满意的效果。整个过程如图6.18-24所示。

3.4.2　人工耳软骨

耳廓是人头部最复杂的一个薄壳状组织，除了耳垂由脂肪和结缔组织构成外，其余部分由软骨构成，外覆软骨膜和皮肤。耳廓软骨借助耳前韧带从耳屏附于颞骨颧突；另借耳廓上肌、耳廓后肌和耳廓前肌等使耳廓附丽于颅骨侧面并与之形成耳廓后方的耳廓后沟。耳廓又称耳壳，总体形状似漏斗。

耳廓分前、后两面，后面较平面微凸，前面凹凸不平形成耳轮、对耳轮，耳轮脚、对耳轮脚、三角窝、舟状窝（或耳舟）、耳甲、耳甲艇、耳甲腔、耳屏对耳屏、耳屏间切迹、耳垂等。耳廓的下三分之一为耳垂。

耳廓软骨是一个不规则的单块弹性软骨。其形状大致与外耳相似。耳垂无软骨，另在耳轮与耳屏之间有裂隙，由致密结缔组织封闭，在耳轮脚上端有一个小的软骨突起，成为耳轮棘。又于耳轮下端发出小舌状突起，称为耳轮尾。耳轮尾与对耳轮借对耳屏耳轮裂分来。耳甲隆起二部之间的浅凹沟，称为耳轮脚沟，它与耳轮脚的位置一致。耳甲隆起与三角窝隆起之间，有一个横沟，称为耳轮横沟，它相当于前外侧面的对耳轮下脚。

小耳畸形是一种与生俱来的发育畸形。对于患者来说，是一种巨大的心理负担和生理残疾。统计表明，小耳畸形在我国的发病率为5 000分之一，在我国这样的人口大国，小耳畸形有一个庞大的患者群。目前，小耳畸形的修复多采用以下两种方法。

第一种修复方法　肋软骨雕刻耳软骨支架。这种方法是应用最多的修复方法（见图6.18-25）。在术前，参考患者检测的外耳廓形状绘制样板，在患处置入液囊备皮。待皮肤膨胀到足够大时，开始手术。

自下而上切取患者左侧肋骨三根，切口处梭形取皮，去皮下脂肪备用。将肋软骨雕刻、修剪并弯曲缝合，成耳软骨状，轮廓尺寸比照事先绘制的样板。将耳软骨支架植入患处皮下，下引流管，梭形皮瓣贴附耳后缝合，包扎，引流。

切取肋软骨雕刻耳软骨支架的方法有其优点，首先是费用低廉，其次材料来自患者自身。没有相容性问题。但是，这种方法的缺点也是明显的。切取肋软骨对患者来说是一个额外的伤害，是一种拆东墙补西墙的方法。雕刻肋软骨，不仅是一个技术问题，更是一种艺术工作。最终修复效果的好坏，直接取决于手术医生的雕刻水平。因此，雕刻手术对医生的要求非常高，患者也无从知道自己未来的耳朵会是什么样子。雕刻过程使手术时间大大延长，加之雕刻技术的要求，大大降低了医院的接诊能力。由于肋软骨较粗大，最终的修复结果并非如人们期待的那样，而是看起来像一只“饺子”。同时，由于肋软骨的刚度较大，修复的耳朵不能像正常耳朵那样弯曲，这给患者的生活带来了许多不便。

第二种修复方法　人工耳软骨支架植入。人工植入物见于市场的是来自美国的Medpor聚乙烯片（见图6.18-26）。该产品采用聚乙烯材料，经过模具成形，将耳软骨支架分解成若干平片，这些平片分3～5个型号，根据患者耳朵大小选择，装配并植入。

该产品的上市，给医患双方都带来了很大的好处。首先，避免了切取肋软骨而带来的额外伤害。由于没有雕刻过程，降低了对医生雕刻水平的要求。缩短了手术时间。





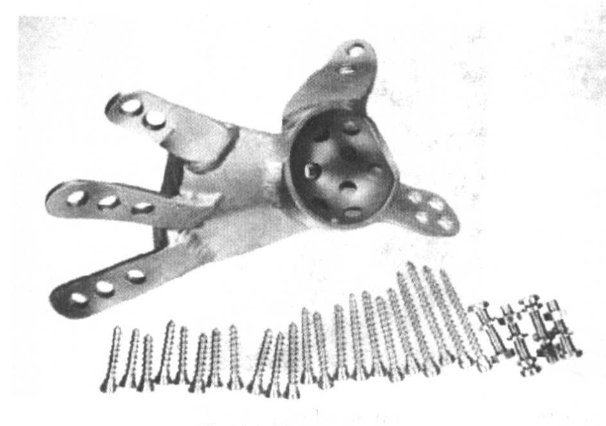
(a) 术前X光照片



(b)骨盆CAD模型图



(c) 根据患者CT数据制作骨盆模型



(d) 植入的全部零部件



(e) 修复件植入以后的X光照片

图 6.18-24 骨盆修复件案例（清华大学激光快速成形中心提供）



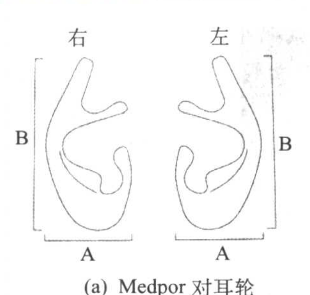
图 6.18-25 肋软骨雕刻

但是，该产品存在三个问题。第一，是其昂贵的造价。一套组件所消耗材料约为 10 g，市场售价占整个治疗费用的 50% ~ 60% 以上。这对于许多中国患者来说，是一笔不小的开支。第二，聚乙烯片的刚度较大，同样面临不能像正常耳朵一样弯曲的问题。第三，由于采用模具生产，不能实现对称修复，无法满足个性化手术的需求。

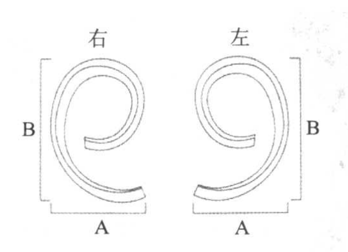
根据患者健侧耳廓的 CT 数据，反求并设计出患侧软骨支架的三维模型，并根据该模型采用生物相容材料进行快速成形，制作出整体式弹性人工耳软骨支架，很好满足了个性化修复的需要。图 6.18-27 为修复过程，图 6.18-28 为修复效果对比。

3.4.3 颅外手术

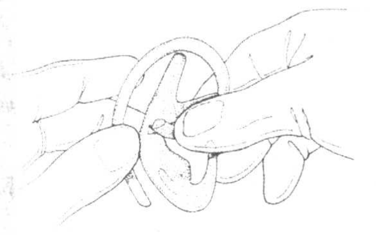
颅骨成形手术是神经外科最古老、最常见手术之一。颅骨因为创伤、感染、肿瘤侵袭、破坏，以及脑水肿、高颅压



(a) Medpor 对耳轮



(b) Medpor 耳轮

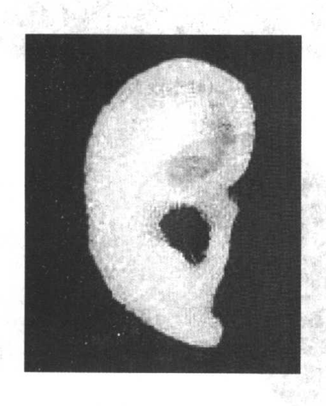


(c) Medpor 修复片组装

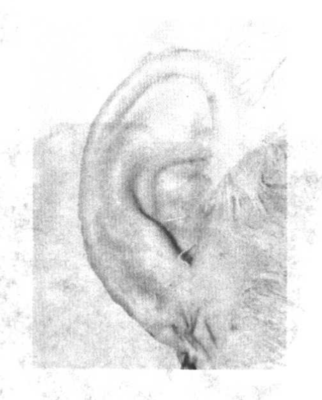
图 6.18-26　Medpor 人工耳软骨支架



(a) 修正的反求结果

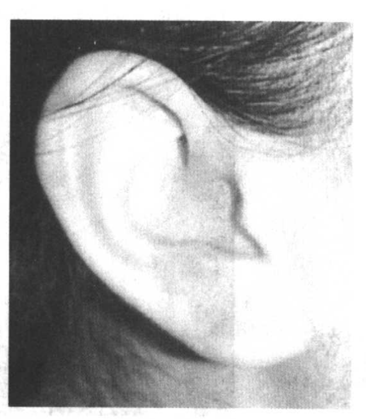
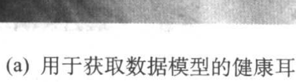


(b) 耳软骨支架



(c) 动物实验结果

图 6.18-27　人工耳软骨修复耳廓（清华大学激光快速成形中心提供）

(a) 用于获取数据模型的健康耳



(b) 植入鼠背修复效果

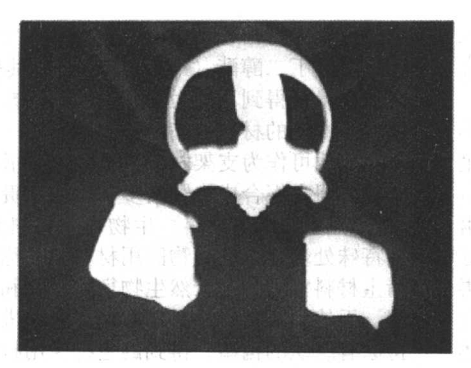
图 6.18-28　用人工耳软骨修复效果对比（清华大学激光快速成形中心提供）

为减压而行颅骨切除术，术后遗留颅骨缺失。为了美观，防止脑组织再次损伤，恢复颅腔密闭性，治疗颅骨缺损综合症，需要行颅骨成形术。

进行手术时需要对修复材料塑形，根据颅骨修复材料的不同，颅骨成形术的塑形方法也不同。基本上分为术前成形和术中成形。术中塑形存在延误手术时间，增加感染机会、反应剩余单体造成组织损伤等缺点。传统的术前成形是通过触摸颅骨缺损边缘，借此确定修复材料的大小、轮廓。可想而知，这种塑形方法难以准确确定颅骨缺损的轮廓和形状，尤其对于美观要求较高的前额部，特别是涉及到眉弓、鼻根时更是难以满足患者的要求；并且随着人民生活水平的提高，患者对手术的要求愈来愈高，不仅要求手术恢复患者的功能，还要恢复患者的容貌，以达到美观要求，可以说传统的术前塑形方法已经不适应目前医学的需求。应用 CT 和快速原形技术，可以模拟患者缺损颅骨的外形和轮廓，加工制作缺损颅骨代用品，这样不仅最大限度的恢复患者容貌而且可以减少手术时间。图 6.18-29 是制作的颅骨补片模型，图 6.18-30 是一例采用快速原形技术颅外手术案例。

3.5　假体的发展方向

1）可预知的修复效果　目前的植入假体，对于硬组织（如颅骨、骨盆）而言，其修复结果（如得到的修复性状、修复功能等）是可以预知的。但是对于埋植很浅的皮下填充物（如隆颏假体），由于被隆起的软组织并非简单、均匀的皮下组织，而是一块形状复杂的肉垫，植入物与这块肉垫的吻合关系难以在植入前精确把握，因此，修复结果的预知，在一定程度上打了折扣。通过对皮下组织几何形为、力学行为的的模拟计算，精确设计人工填充物，并模拟植入后外观效果，解决植入物与复杂皮下组织吻合与外观形状的预测问题。



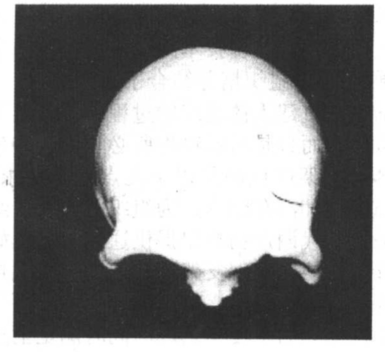


图 6.18-29　采用快速原形技术制作的颅骨模型及补片（北京殷华公司提供）

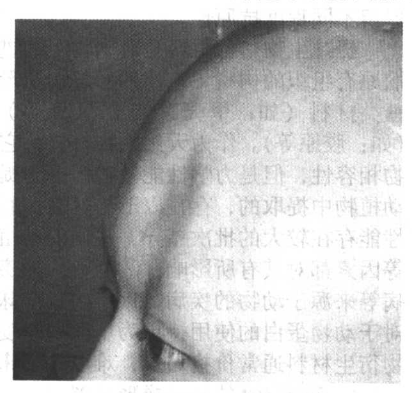




图 6.18-30　采用快速原形制作补片的手术效果（北京殷华公司提供）

2）更细小的假体　进一步提高植入物的成形精度，是假体制造的另一发展方向。目前熔融挤出制造（MEM）的成形精度在 0.15mm 左右，立体光刻设备（SLA）的成形精度为 0.01 mm。前者在耗材上由于易于得到组织相容材料而较早在假体制造中得到应用。但是，其成形精度在制作精细结构的假体（如泪腺管、听小骨）时，其适应性较差。后者精度较高，但是生物相容性材料（耗材）的开发，目前还难以满足要求。因此，提高 MEM 工艺的成形精度，使其能够成形尺寸更小、精度更高、具有更精细细微结构的植入物，将会使 MEM 工艺获得更大的应用空间。

3）高仿生的材料　目前，植入物由于受材料、成形工艺等要求，最终性能只能部分地模仿天然组织的性能。如模仿几何形状以便完成准确的空间占位和组织连接，模仿强度以便承受内、外力的作用，但是，还有诸多生理的功能和物理性能难以模仿甚至无法模仿。高仿真植入物的研制，不仅依赖于成形技术的发展，更依赖于材料科学的进步。可以预见，在组织工程学难以实现的修复器件生产领域，具有高仿真性能的假体将大有用武之地。

4　组织工程生物材料的快速成形

4.1　组织工程

组织工程是综合应用工程学和生命科学的基本原理、基本理论、基本技术和基本方法，在体外预先构建一个有生物活性的种植体，然后植入体内，修复组织缺损，达到提高生活、生存质量，延长生命活动的目的。这一内涵的核心是活的细胞、可供细胞进行生命活动的支架以及生长因子。

组织工程技术的本质在于将活的细胞（干细胞或干细胞以外的其他体细胞）通过某种方式与基质（matrix）或载体支架（scaffold）结合起来制造新组织。活的细胞可以在基质或载体支架植入体内后逐步长入其中，也可以在基质或载体支架植入体内之前通过细胞/组织培养与之结合。

目前组织工程的研究已经在构建皮肤、软骨、肝脏、胰腺、骨、血液、肌肉、血管和神经等组织器官方面取得了很大的进展。最成功的组织工程化产品是人工皮肤，即植入多孔的胶原-葡萄糖胺聚糖支架材料体内再生皮肤，目前的上市产品有 Advanced Tissue Sciences 公司的 Dermagraft-TC、Organogenesis 公司的 Apligraf 及瑞士公司 Modex Therapeutics 的 EpiDexTM 等，Reprogenesis 公司的软骨产品也进入三期临床实验：骨和软骨是组织工程研究最多的组织，有望成为下一个组织工程产品。

组织工程将工程学原理同细胞学和组织生物学原理结合起来，以替代有缺陷（已老化、受损伤或病态）的组织和器官。植入体可以改造为宿主组织的一部分，参与宿主组织的新陈代谢，而且与天然的组织和器官具有相同的功能，还可防止免疫排斥的产生，被认为是很有希望解决组织和器官修复难题的途径。

组织工程的概念提出后，美国国家科学基金 NSF（The National Science Foundation）资助建立了一系列实验室。紧随美国之后，日本、加拿大、欧洲、澳大利亚和中国等国家和地区也先后开始进行组织工程学研究。

组织工程的三要素为：载体支架（简称支架，也称载体框架）、细胞和生长因子（也称诱导因子、信号分子）。图 6.18-31 表示了组织工程的策略，图中包含了两条不同的技术

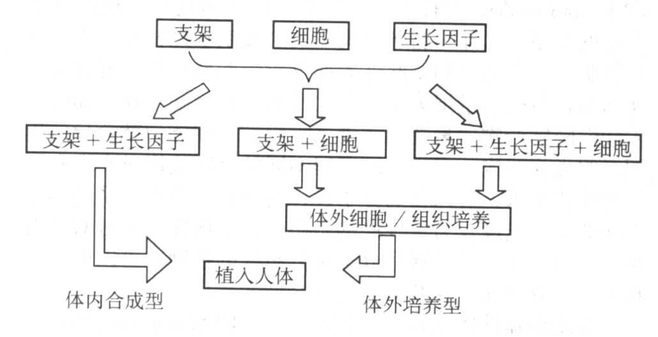


图 6.18-31　组织工程策略示意图

路线：体内合成型技术路线的特点在于活的细胞在支架植入体内后逐步长入其中；而体外培养型技术路线的特点在于支架在植入体内之前就通过细胞/组织培养结合了活的细胞。

在通过组织工程的方法重建人体组织的过程中，支架不仅是细胞黏附生长的载体，而且是组织再生所必须的某些生长因子的可控缓释载体。支架应该满足以下几点性能要求：①三维贯通的可控孔隙结构和高孔隙率，为组织的长入、组织再生过程中的营养输送和代谢产物排出提供通道；②良好的生物相容性和生物降解性能，实现支架降解速度与组织再生速度的良好匹配；③适合细胞黏附、增殖与分化的表面化学性能；④良好的力学性能。为了使支架能够同时满足上述复杂的性能要求，支架往往是由两种或两种以上不同材料组成的复合材料，而且应该具有适合组织再生的复杂多孔结构。因此，支架是一种复杂的非均质多孔结构，是一种充满生机的蛋白和细胞活动、繁衍的环境，它要求具有与人体组织器官在功能梯度上相一致的材料结构、几何结构和生理功能。

鉴于组织工程支架的复杂性，快速成形技术应用于组织工程的优势主要体现在支架的成形上。基于离散-堆积原理的快速成形技术具有高度的柔性，是组织工程支架理想的成形方式，其优势一方面体现在 RP 可以成形复杂的三维结构，另一反面也体现在 RP 可以用于加工多种生物材料，即利用 RP 进行支架成形，可以同时实现支架理想的结构梯度和材料梯度。

4.2 组织工程生物材料

4.2.1 材料种类

应用于组织工程的生物材料种类繁多，按材料的来源分，可以分为天然材料和人工材料；按材料的成分和性质可将其分为生物陶瓷、合成高分子材料、生物衍生材料等。由于单一材料大都存在某些方面的缺陷，因此复合材料被广泛地使用，以集成各组分的优势使之具有优良的综合性能。

1）生物陶瓷　生物陶瓷根据其在生物体内的稳定性可分为惰性生物陶瓷和活性生物陶瓷。组织工程应用的主要是活性生物陶瓷，包括钙磷盐、生物活性玻璃（Bioglass，BG）等，最常用的是羟基磷灰石（HA）、磷酸三钙（TCP）等钙磷盐。

2）合成高分子　人工合成的生物降解高分子材料具有可控的生物降解速度、力学性能和加工成形性能。

脂肪族聚酯类高分子材料是目前应用最多的合成高分子材料，主要有聚乳酸（Polylactide，简称 PLA）、聚羟基乙酸（Polyglycolide，简称 PGA）和聚乳酸/羟基乙酸共聚物（Poly lactide-co-glycolide，简称 PLGA）。乳酸有两种旋光异构体，即左旋乳酸（LLA）和右旋乳酸（DLA），因此其均聚物 PLA 有3种基本立体构型：聚左旋乳酸（PLLA）、聚右旋乳酸（PDLA）和聚消旋乳酸（PDLLA）。这些材料都已经获得了美国 FDA 的批准，可以应用于人体植入。此外，聚已内酯（Polycaprolactone，简称 PCL）具有高药物透过性，也得到了广泛的应用。大部分脂肪族聚酯的表面亲水性较差，不利于与细胞和组织的亲和。此外大部分脂肪族聚酯在降解过程中伴随着材料的重量损失会产生大量的酸性降解产物，如果产生酸性降解产物的量超出了周围组织的代谢能力就会导致周围组织炎症反应。由于组织工程不同的临床应用对支架有不同的性能要求，可以在高分子设计的基础上合成一系列具有不同的降解速度及力学性能的脂肪族共聚内酯，通过对材料组分、组成比、分子量和分子量分布等的控制，可以调节材料的生物降解速度在几周到几年之间变化。

聚醚酯弹性体是将不同软硬度、不同亲疏水性的材料进行共聚得到的，它是一种价廉易得、力学性能优良，具有可降解性及生物相容性的合成高分子材料，如聚乙二醇/聚对苯二甲酸丁二醇酯（PEG/PBT）嵌段共聚物。通过调节两种组分含量可得到不同力学性能、不同亲疏水性能、不同降解速率等性能的材料，满足不同用途。

其他可作为支架材料的还有聚酸酐（PCPP）、聚甲氨基酸等，但它们合成步骤繁多，价格昂贵，仍需进一步研究。

3）生物衍生材料　生物衍生材料是将天然生物组织进行特殊处理得到的生物医用材料，又称生物再生材料。生物衍生材料又可分为天然生物衍生材料和提纯生物衍生材料。

天然生物衍生材料是对动物组织进行物理化学处理，维持原有组织的构型，得到的生物医用材料，如脱细胞的松质骨支架和脱钙骨基质等，但这种处理后的动物组织仍然可能保留不同程度抗原性。

提纯生物衍生材料是对动物组织进行生物化学处理，拆散原有组织的构型，重建的新的物质形态，主要包括天然聚糖类材料（如：甲壳素与壳聚糖等）和天然高分子材料（如：胶原等）。作为天然生物材料，它们通常具有良好的生物相容性，但是力学性能较差。由于提纯生物衍生材料是从动植物中提取的，存在以下与其来源有关的问题：①成分和性能存在较大的批次差异，不同的动植物品种、年龄和产地等因素都对其有所影响；②存在传播疾病的潜在危险，疯牛病等来源于动物的疾病，近年来在全球的广泛传播，使人们对于动物蛋白的使用持更为审慎的态度；③高纯度的提纯生物衍生材料通常价格昂贵，难以在临床推广应用。

4.2.2 基于 RP 的材料成形性能

物质具有气、液、固三种状态。气体和液体具有良好的流动性，即具有优良的变形能力，但液体更易于控制，而固体具有零件（产品）所需的保持一定形状的能力。因此，以液体为输入的原料状态、固体为输出的产品状态，利用材料的相变过程进行快速成形是非常有效的加工方式。

对于利用其液/固相变进行成形制造的材料，研究成形性能即研究在液态、液固转化、固态三个阶段对材料的形状进行控制的可能性和难易程度，主要包括以下几个方面：

1）液态下的流变学性能　好的成形性能表示对材料的流动过程和流动状态易于调节和控制；

2）相变性能　相变过程通常是在能量作用下完成的，因此好的成形性能表示相变对能量通断的响应灵敏；

3）固态下的力学性能　材料在加工过程中应力、应变小，塑性好。

4.3 组织工程生物材料的快速成形工艺

4.3.1 低温沉积制造工艺

组织工程支架的孔隙通常具有精细的分级结构，根据孔径的尺度大致可以分为大孔和微孔（通常以 100 μm 为界）。清华大学开发的低温沉积制造 LDM 工艺将快速成形的离散-堆积原理与热致相分离法相结合，能够实现支架分级结构孔隙的成形，是理想的支架成形方法。

利用高分子或高分子基复合材料固-液态转变进行成形是有效的快速成形加工手段，方法是首先将材料转变成液态，再以某种方式将其固化为一定的形状完成成形。常用的液化方式有熔融和溶解。对高分子生物材料，熔融有可能引起聚合物分解、分子量及分子量分布改变等，使材料的性能特别是生物性能发生变化。相对而言，采用溶解的方式对高分子的性能影响很小。低温凝固是将溶液固化的简便方法。成形工艺要求材料必须经历一个可控的相变过程。低温固化得到的产品在室温下会融化，需要采用冻干等后处理方式将溶剂去除，使高分子材料能在常温下保持三维形状。基于以上考虑，LDM 工艺对生物材料采用如图 6.18-32 所示的工艺路线进行成形。

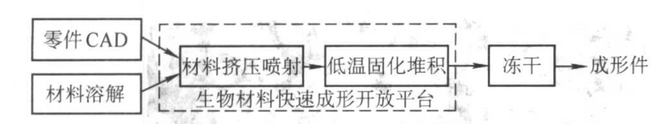


图 6.18-32　LDM 工艺路线

该工艺的物理过程是首先将生物材料溶于溶剂，然后基于 RP 的离散-堆积原理，将材料溶液通过专用喷头挤压成纤维状加工单元（微流），将该单元堆积组装为所需的三维实体，同时在低温下固化，实现成形。在低温环境中，材料溶液发生相分离，分解成富溶剂相和富溶质相，在后续的冻干过程中溶剂被升华，留下微孔结构，这些微孔在组织工程应用中是重要的营养通道和代谢通道。

利用 LDM 工艺成形组织工程支架，其本质在于根据组织或器官的解剖学数字模型（零件 CAD），在计算机控制下将材料的组装过程与热致相分离过程相结合，同时结合冻干技术，最终形成独特的支架。此工艺采用溶解-低温固化方式可以基本保持材料的性能特别是生物学性能不变；材料的挤压喷射和低温固化、冻干结合，即将 RP 与热致相分离结合，可以同时完成任意复杂三维宏观大孔结构（100 μm 以上）和理想微孔结构（100 μm 以下）的成形，非常适用于组织工程应用。

4.3.2　工艺对成形效果的影响

（1）成形效果评价标准

1）宏观效果　孔隙体支架的 CAD 设计结构如图 6.18-33 所示。但实际成形时，材料在堆积路径上将发生一定的展布，如图 6.18-34 所示。设计图形与实际大孔结构之间的误差包括以下三类：垂直展布、弯月面、路径变窄，误差严重时材料将堵塞大孔。

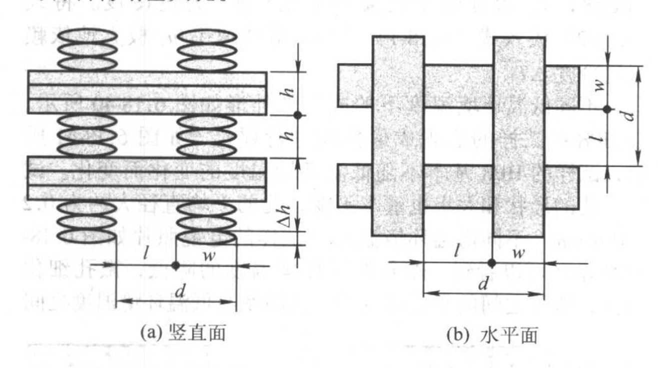
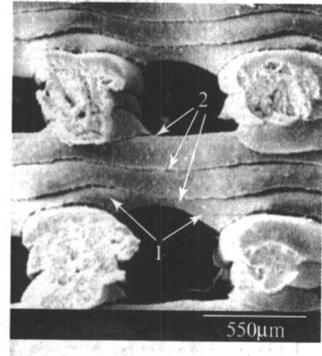
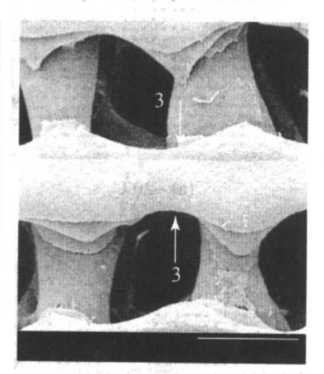


图 6.18-33　平行线交叉沉积得到的支架大孔结构示意图



(a) 竖直截面



(b) 水平截面

图 6.18-34　支架堆积大孔结构的扫描电镜照片

1—垂直展布；2—弯月面；3—路径变窄

因此可以定义支架的大孔通透率（Hole Penetration Rate，简称 HPR）对成形件宏观的形状误差进行表征。所谓 HPR 即对于如图 6.18-34 所示试样，成形后水平面上实际贯通的孔的数目占理论孔数的百分率。

宏观成形效果还包括大孔直径、孔形状、粘接效果等。

2）微观效果　微观效果主要通过电镜对成形件的微观结果进行观察，主要包括微孔大小、形状、孔之间的贯通性等。

3）孔隙率　对组织工程应用而言，孔隙率是支架的主要指标之一。所谓支架的孔隙率，是指支架中孔的体积占支架表观总体积的百分比，用 ε 表示。

（2）成形效果影响

1）喷头温度的影响　不同喷头温度下的成形件如图 6.18-35 所示。以 HPR 对试样的宏观成形性能进行评价，如图 6.18-36 所示，试样的 HPR 随喷头温度的提高而下降。另外，随着喷头温度的提高，大孔的棱角越来越圆润，孔的平均直径约从 0.3 ~ 0.5 mm 下降到 0.1 ~ 0.3 mm。

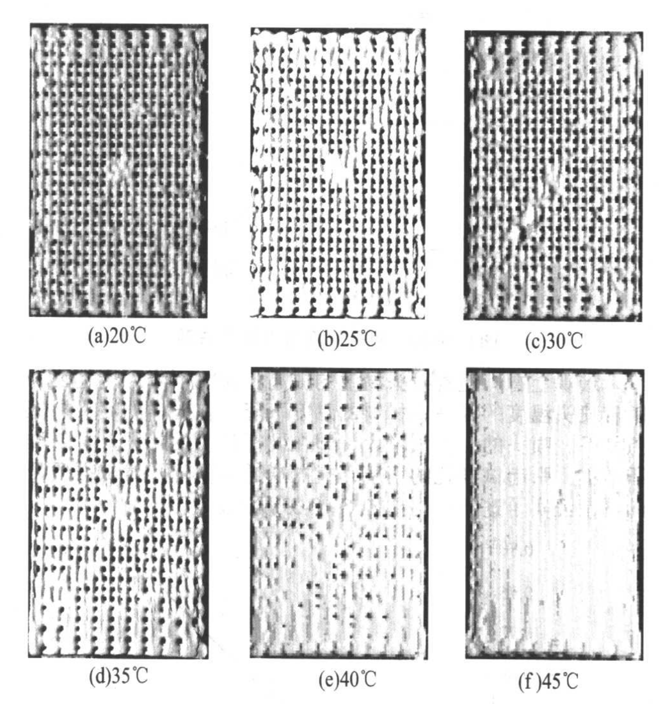


图 6.18-35　不同喷头温度下试样比较

（试样平面尺寸约为 21 × 29 mm）

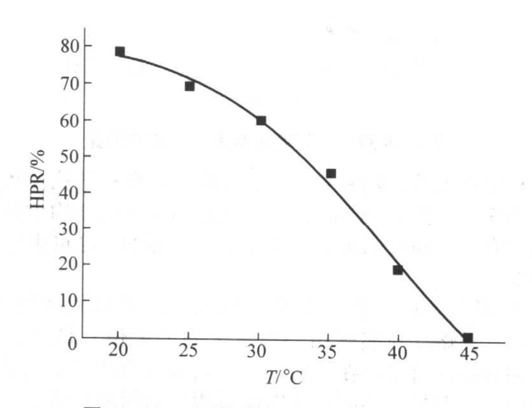
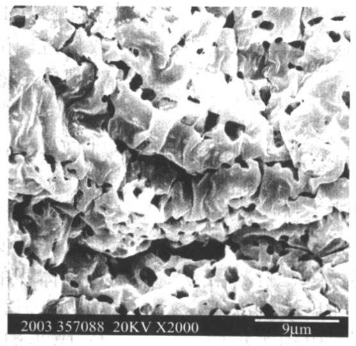


图 6.18-36　不同喷头温度下试样的 HPR

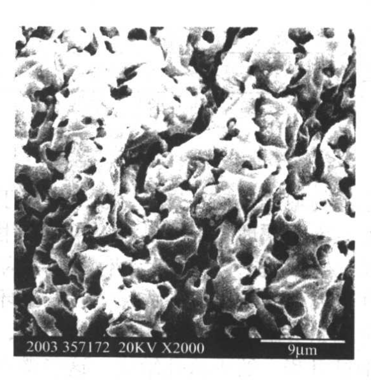
不同温度下试样的电镜照片如图 6.18-37 所示，可以看到，随着喷头温度的提高，微孔的孔径和形状基本不变，孔隙的贯通性略有改善。孔隙率与喷头温度之间的关系如图 6.18-38 所示，随着喷头温度变化，孔隙率的调节范围约为 10%。



(a) 20℃



(b) 30℃



(c) 40℃

图 6.18-37 不同喷头温度下试样的电镜照片

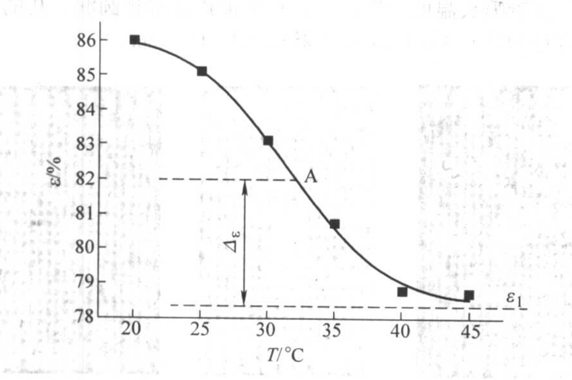


图 6.18-38 喷头温度与孔隙率关系

宏观上看，随着喷头温度的提高，HPR 下降。这是因为随着喷头温度的提高，材料的黏度下降，在同样的喷头挤压条件下，喷头的出丝量增大，即在同样长度的路径上材料堆积增加，引起试样孔的堵塞，孔的通透率下降。对试样质量的测量证实了这一点，如图 6.18-39 所示。

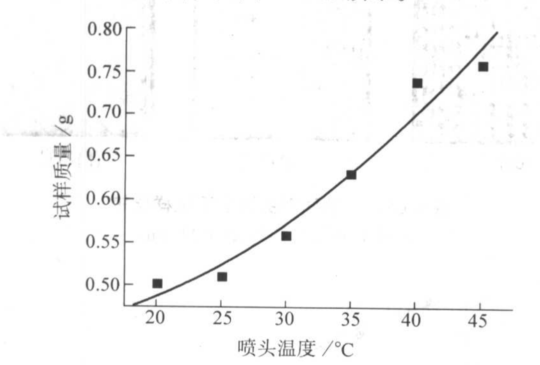


图 6.18-39 不同喷头温度下试样的质量

从微观上看，随着喷头温度的提高，微孔的孔径和形状基本不变（如图 6.18-37 所示）。这是因为微孔结构主要和凝固过程有关，而凝固过程主要受过冷度影响，这可由冰箱温度调节。

2) 低温环境温度的影响　现代结晶或凝固理论指出，过冷度（即熔点与实际结晶温度之间的差值）是凝固的条件。凝固过程首先是在液相中形成固相的结晶核心（形核），然后通过这些核心不断长大完成液相向固相的转变。

形核可以分为均质形核和异质形核，现成固相界面往往最易促使晶核的形成，即异质形核。支架成形过程是液态材料铺展堆积在已成形固态表面上而凝固的过程，因此这个形核过程是异质形核。在异质形核过程中，液相中的原子集团依赖于已有异质固相表面，并在界面张力的作用下形成新生固相。Turnbull 等关于异质形核过程中的形核自由能 ΔG_s 及异质晶核单位面积上的形核速率 u_s 的计算式分别为：

$$\Delta G_s = \frac{4}{3}\pi r_c^2 \sigma f(\theta) \tag{6.18-1}$$

$$u_s = \frac{N_s kT}{h}\exp\left(-\frac{\Delta G_A}{kT}\right)\exp\left[-\frac{a\sigma^3 f(\theta)}{kT(\Delta G_v)^2}\right] \tag{6.18-2}$$

式中，σ 为界面能；r_c 为晶核临界半径；θ 为新生晶体对异质晶核的接触角；$f(\theta)=\frac{1}{4}(2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2$；$N_s$ 为单位面积上的原子总数；k 为玻尔兹曼常数；h 为普朗克常数；T 为温度；ΔG_A 为原子跃迁穿过液固界面的激活能；ΔG_v 为体积自由能。而

$$\Delta G_v = -\frac{V\Delta h}{T_0}\Delta T \tag{6.18-3}$$

式中，V 为晶核体积；Δh 为凝固过程的焓变，近似等于结晶潜热；T_0 为合金平衡凝固温度；ΔT 为过冷度。将式（6.18-2）代入式（6.18-1）可知，形核速率 u_s 极大地依赖于过冷度 ΔT。

不同低温环境温度下的成形件外形如图 6.18-40 所示。以 HPR 对试样的宏观成形性能进行评价，如图 6.18-41 所示，试样的 HPR 基本不随低温环境温度的变化而变化。试样大孔的形状和大小也基本不变，孔的平均直径大约为 0.2 ~ 0.4 mm。不同低温环境温度下试样的电镜照片如图 6.18-42 所示，可以看到，随着低温环境温度的降低，微孔细化明显，微孔之间的贯通性变差。孔隙率与低温环境温度之间

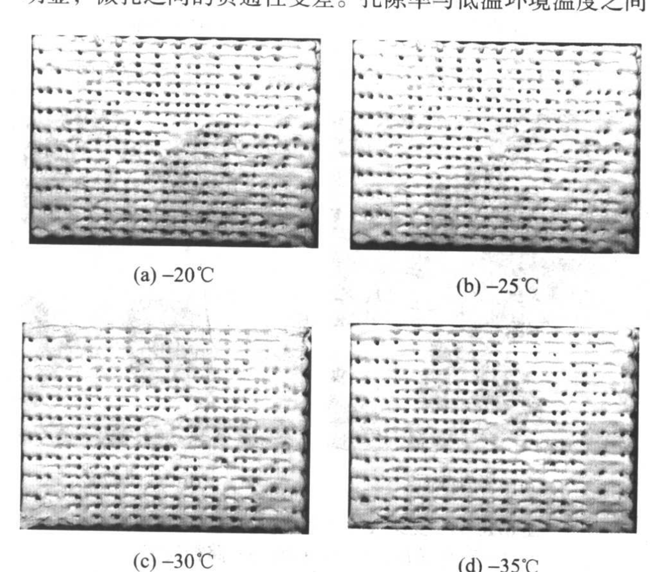

(a) −20℃　(b) −25℃　(c) −30℃　(d) −35℃

图 6.18-40 不同低温环境温度下试样比较
（试样平面尺寸约为 21 × 29 mm）

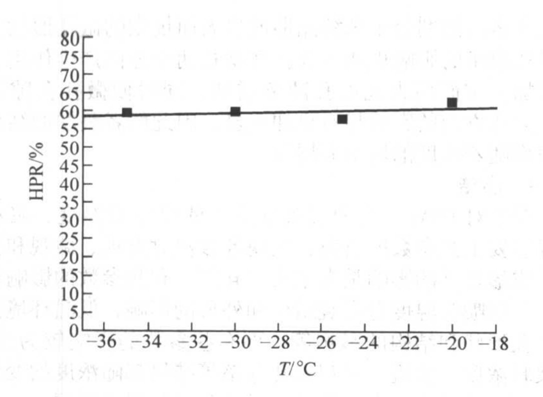
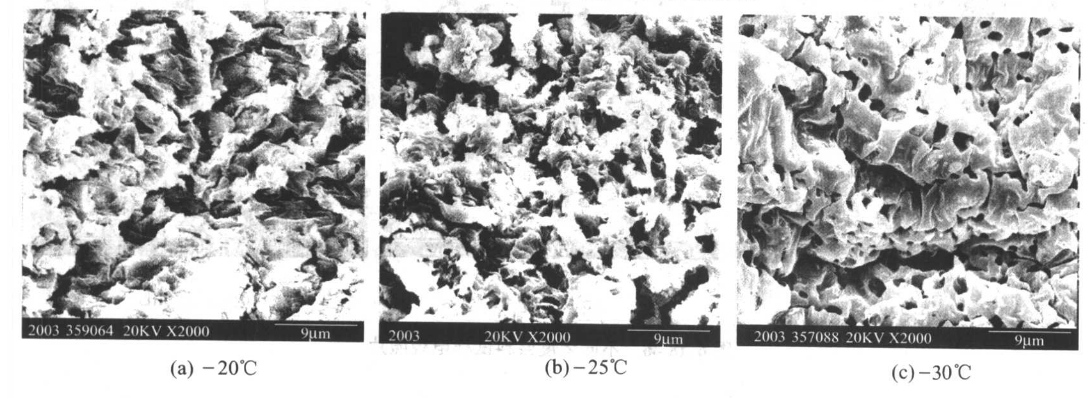


图 6.18-41　不同低温环境温度下试样的 HPR

的关系如图 6.18-43 所示。随着低温环境温度的变化，孔隙率的调节范围大约仅为 1%。

从宏观结果看，试样的 HPR 基本不随低温环境温度的变化而变化。试样大孔的形状和大小也基本不变。对比喷头温度对成形效果的影响，可知对 LDM 工艺而言，试样的宏观的形状误差主要受材料挤压喷射过程影响，其核心的物理过程是液态材料的流动过程，对其进行控制的主要工艺参数是喷头温度，通过控制材料黏度来控制材料的流动。基于这样的考虑，要实现宏观上的结构和外形的精确成形，首先需要保证材料的黏度，材料黏度的控制是宏观精确成形的前提。

从微观结果看，随着低温环境温度的降低，微孔细化，贯通性变差。微观结构主要是材料凝固相变过程形成的。过冷度是凝固的条件，是影响相变过程的主要参数。过冷度主要通过调整冰箱温度建立，低温环境温度越低，过冷度越大。通过对浆料相变性能的研究可知，浆料的凝固主要是小分子溶剂 1，4-二氧六环的结晶过程。过冷度越大，小分子形成的晶核越多，而且来不及充分长大，因此形成的微孔细化，贯通性变差。



(a) −20℃　(b) −25℃　(c) −30℃

图 6.18-42　不同低温环境温度下试样的电镜照片

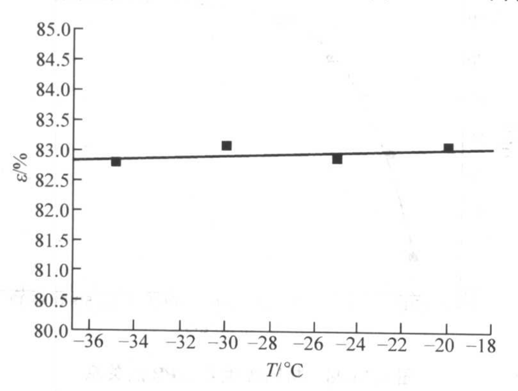
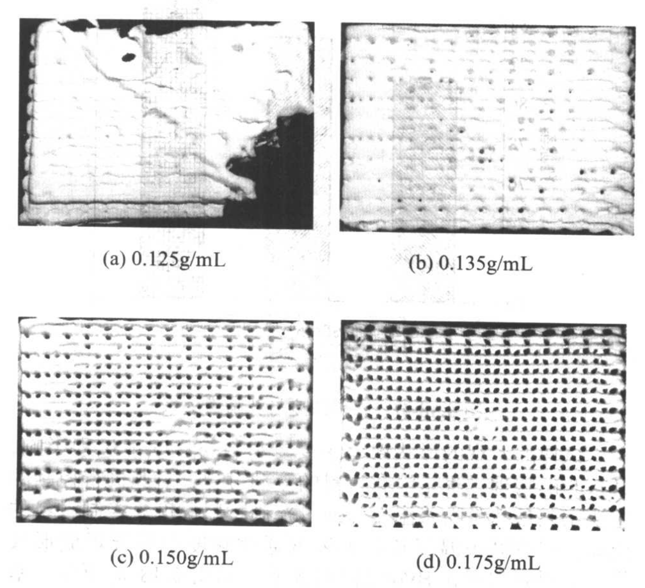


图 6.18-43　低温环境温度与试样孔隙率关系

从孔隙率结果看，孔隙率随低温环境温度的变化而变化不大。支架的孔隙率 ε 是大孔率 ε_a 和微孔率 ε_i 之和，由于试样的宏观成形效果基本不随低温环境温度的变化而变化，可以认为大孔率 ε_a 基本不起作用，因此支架的孔隙率 ε 的变化也相对较小。对比喷头温度对孔隙率的影响，可知大孔率 ε_a 对孔隙率 ε 的调节作用要大于微孔率 ε_i 的作用。

3）浆料浓度的影响　不同浓度浆料的成形件如图 6.18-44 所示。以 HPR 对试样的宏观成形性能进行评价，如图 6.18-45 所示，试样的 HPR 随浆料浓度的提高而提高。另外，随着浆料浓度的提高，大孔的棱角越来越尖锐，由圆形趋向方形，大孔的平均直径约从 0.1 ~ 0.3 mm 上升到 0.3 ~ 0.5 mm。

图 6.18-46 所示为不同浓度下试样的电镜照片，可以看到随着浓度的增加，试样微孔孔径变小，微孔的形状变得不规则。浆料浓度与支架孔隙率之间的关系如图 6.18-47 所示，



(a) 0.125g/mL　(b) 0.135g/mL　(c) 0.150g/mL　(d) 0.175g/mL

图 6.18-44　不同浓度浆料试样比较
（试样平面尺寸约为 21 × 29 mm）

随浆料浓度的上升而上升，变化范围约为 5%。

从实验结果看，浓度对成形效果的影响是全面的，浓度不仅影响宏观效果，也同时影响微观效果和孔隙率。

浓度对 HPR 的影响是基于浓度对材料黏度的影响，粘度随浓度的增加而增加，同样条件下的喷头出丝量减少，HPR 上升。随着浓度的增加，试样微孔孔径变小，微孔的形状变得不规则，这是由于试样的孔隙主要是溶剂冻干升华留下的空位，随着浓度的增加，溶剂小分子所占比例减少，没

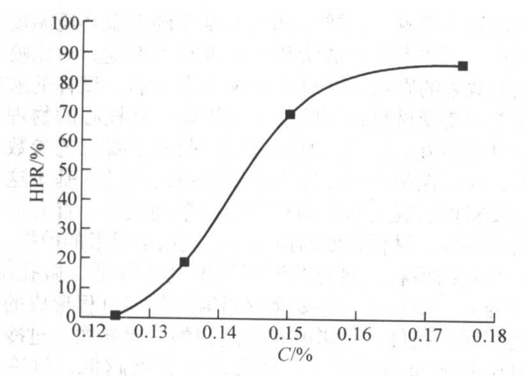
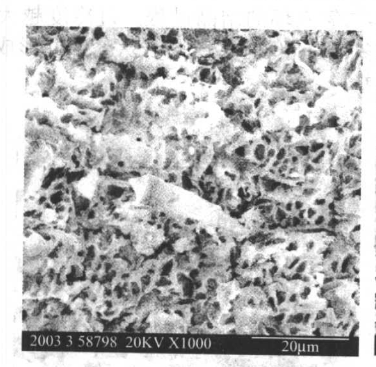


图 6.18-45　不同浓度浆料试样的 HPR

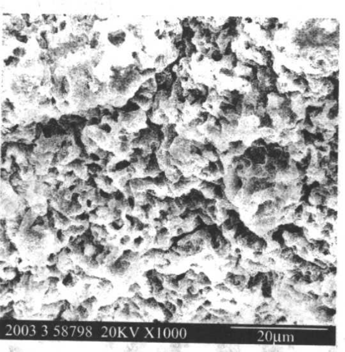
有充分多的溶剂分子来结晶形成粗大而规则的微孔形状。浓度对孔隙率的影响也通过大孔和微孔两个方面产生作用，浓度增加一方面使大孔的孔隙率增加，同时使微孔孔隙率降低，大孔方面的影响相对更加明显，因此两者叠加的结果是孔隙率随着浓度的增加而增加。

4.3.3　小结

基于对 LDM 工艺的喷头温度、低温环境温度、浆料浓度等主要工艺参数的研究，发现各参数对宏观、微观和孔隙率等成形效果的影响是有很大差异的。有些参数的影响较为单一，如喷头温度对宏观结构和外形的影响、低温环境温度对微孔形状和结构的影响等，而有些参数的影响较为全面，如浆料浓度，宏观、微观和孔隙率等结果都随浓度的变化而变化。这些结论可以对工艺的设计和优化提供依据。



(a)0.135g/mL



(b)0.150g/mL



(c)0.175g/mL

图 6.18-46　不同浓度浆料试样电镜照片

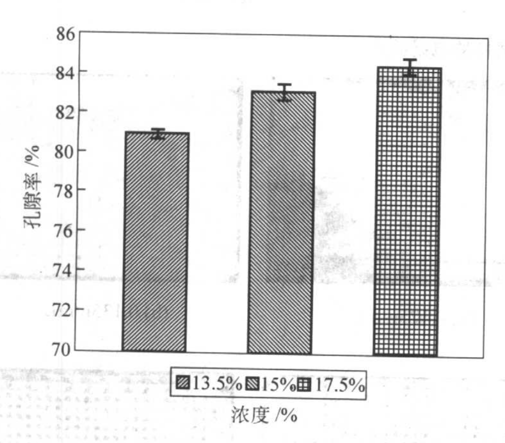


图 6.18-47　浆料浓度与孔隙率关系

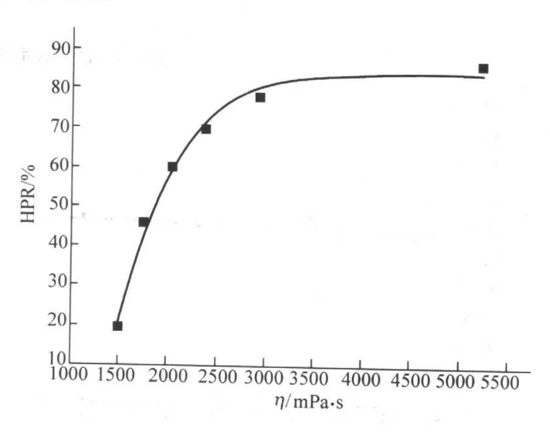


图 6.18-48　材料黏度与 HPR 的关系

试样的宏观的形状误差主要受材料挤压喷射过程影响，其核心的物理过程是液态材料的流动过程，对其进行控制的主要工艺参数是喷头温度，通过控制材料黏度来控制材料的流动。归纳喷头温度和材料浓度通过黏度影响宏观成形效果，可得到黏度和 HPR 之间的关系，如图 6.18-48 所示。基于这样的考虑，要实现宏观上的结构和外形的精确成形，首先需要保证材料的黏度，材料黏度的控制是宏观精确成形的前提。

微观结构主要是材料凝固相变过程形成的，过冷度是凝固的条件，是影响相变过程的主要参数。对微孔形状、大小、贯通性等微观结构的调整可以通过控制低温环境温度来实现。

浓度对成形效果的影响是全面的，不仅影响宏观效果，也同时影响微观效果和孔隙率。浓度对宏观效果影响的机理与喷头温度相同，都是通过影响材料黏度而实现。但是浓度对微观效果的影响机理却与低温环境温度不同，低温环境通过建立过冷度调节微观效果，而浓度则通过改变结晶成分的数量和比例来实现对微观效果的调节。

4.4　应用

清华大学和第四军医大学全军骨科研究所及中科院化学所合作，开展快速成形应用于组织工程的研究，在骨、软骨等组织工程中取得了良好的效果。

4.4.1　骨组织工程应用

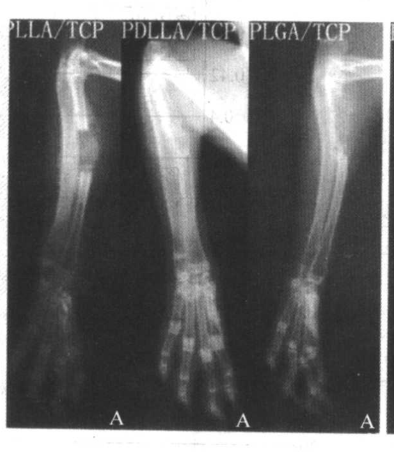
（1）修复兔桡骨缺损

以脂肪族聚酯和钙磷盐的复合材料作为支架材料，脂肪族聚酯分别采用 PLLA、PDLLA 和 PLGA，钙磷盐采用 TCP。

采用 LDM 工艺，分别将 PLLA/TCP、PDLLA/TCP 和 PLGA/TCP 成形成具有梯度孔隙结构的支架，其规格为直径 5 mm，长度 15 mm 的圆柱体；分别复合生长因子牛骨形态发生蛋白（BMP）和碱性成纤维细胞生长因子（bFGF）；将复合生长因子的支架植入兔桡骨处 15 mm 的缺损中，在 12 周内对植入处进行检查，观察骨缺损修复情况。



1）影像学检查 各材料组在4周时可见都有新骨形成，12周时，皮质连续，其中PLGA组皮质已塑性（图6.18-49）。



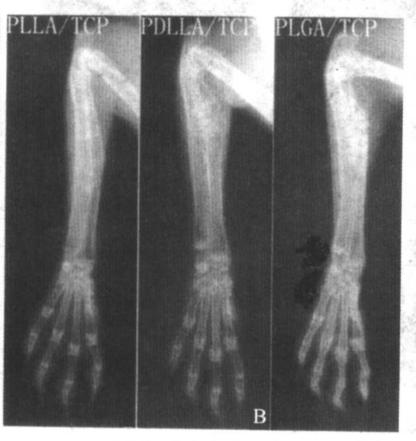


图6.18-49 影像学结果（A：4周；B：12周）
（清华大学激光快速成形中心和第四军医大学提供）

2）组织学观察 术后12周取材时可见各组复合BMP的材料和桡骨断端已连接，骨痂连续，有不同程度的部分塑性（图6.18-50）。

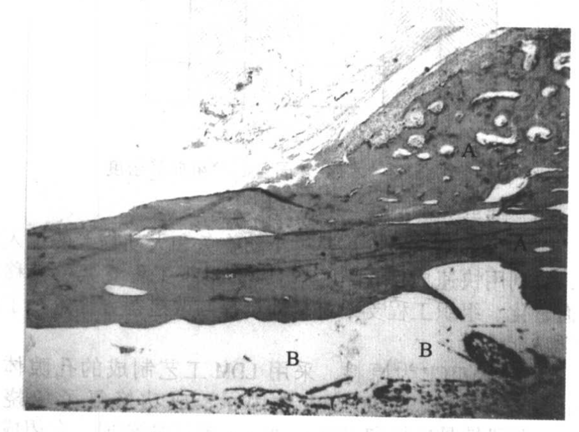


图6.18-50 PLGA/TCP组12周
（HE染色，100×；A. 新生骨痂；B. 骨髓腔）
（清华大学激光快速成形中心和第四军医大学提供）

从图6.18-50可以看出，新生骨髓腔完全贯通，皮质骨基本塑形完毕，基本无材料残余。

3）材料降解率和骨密度测定 术后12周各材料的降解率如图6.18-51所示，各实验组骨痂与正常桡骨的骨密度值如图6.18-52所示。可以看到，实验组的材料已经基本降解，新生骨组织的密度与正常骨组织的密度接近。

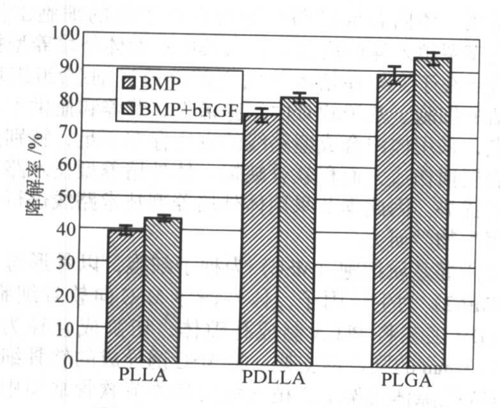


图6.18-51 12周各材料的降解率

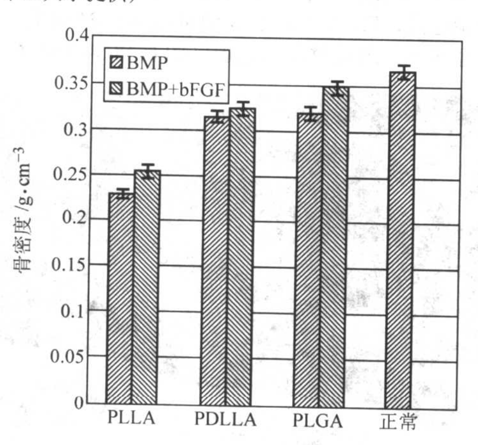


图6.18-52 12周各材料的骨密度

4）新生血管密度 术后12周各实验组血管密度如图6.18-53所示。

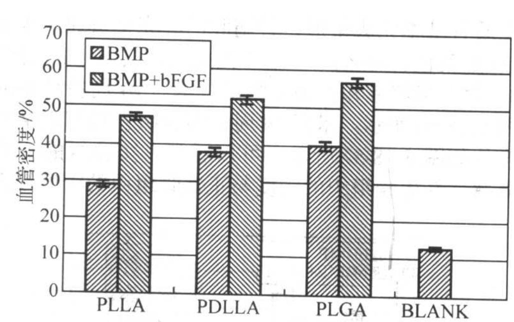


图6.18-53 术后12周各实验组血管密度

（2）修复犬桡骨缺损

采用PDLLA和PLGA两种聚酯与TCP的复合材料进行实验。

采用LDM工艺，分别将PDLLA/TCP和PLGA/TCP成形成具有梯度孔隙结构的支架，其规格为直径10 mm，长度20 mm的圆柱体；分别复合生长因子牛骨形态发生蛋白（BMP）和碱性成纤维细胞生长因子（bFGF）；将复合生长因子的支架植入犬桡骨处20 mm的缺损中，在24周内对植入处进行检查，观察骨缺损修复情况。

1）影像学检查 bBMP + bFGF材料组，A：4周时，新生骨痂形成，已经将断端连接，B：24周时，骨痂已经塑形，未见材料占位影。



图 6.18-54 影像学结果（A：4 周时 X 片；B：24 周时 X 片）
（清华大学激光快速成形中心和第四军医大学提供）

2）组织学观察 术后 4 周新生骨痂形成，已将材料和桡骨断端连接，PLGA 组新生骨痂量较大；24 周时，两组骨痂均已经塑性，未见材料占位影（图 6.18-54 和图 6.18-55）。

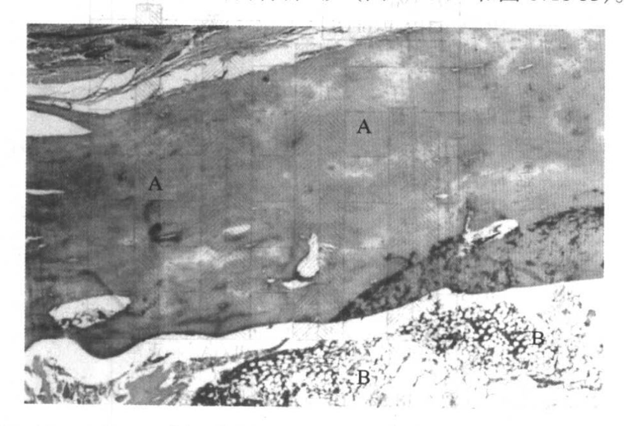


图 6.18-55 PLGA/TCP 组 24 周
（清华大学激光快速成形中心和第四军医大学提供）

皮质骨基本完成塑形，骨髓腔已经完全贯通，未见残留材料（HE 染色，50×；A. 塑形完成的骨皮质，B. 骨髓腔）

3）材料降解率和骨密度测定 术后 24 周各材料的降解率如图 6.18-56 所示。术后 24 周各实验组骨痂与正常桡骨的骨密度值如图 6.18-57 所示。可以看到，实验组的材料已经基本降解，新生骨组织的密度与正常骨组织的密度接近。

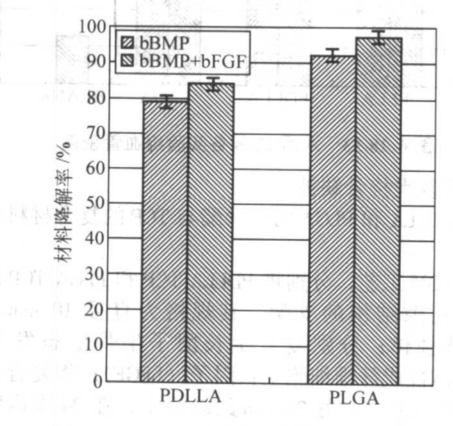


图 6.18-56 24 周材料的降解率

4）新生血管密度 术后 24 周各实验组血管密度如图 6.18-58 所示。

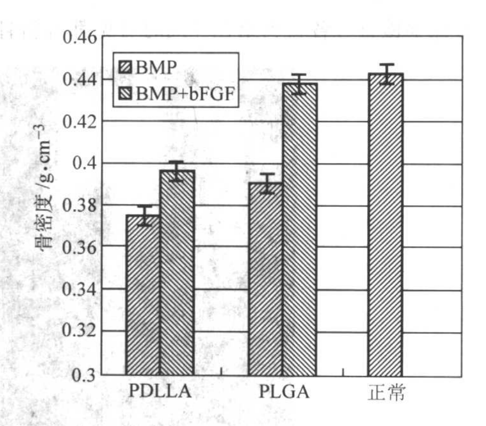


图 6.18-57 24 周的骨密度

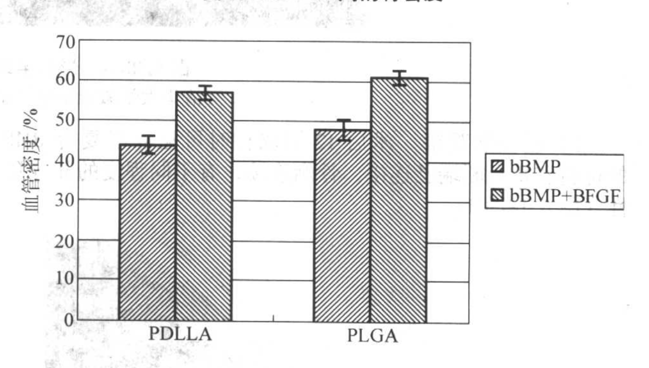


图 6.18-58 术后 24 周各实验组血管密度

（3）结果分析

结合骨的组织特点，通过小动物兔和大动物犬的植入实验，对利用快速成形 LDM 工艺成形组织工程支架、骨移植的血管化、组织工程支架材料的选择与改进等方面进行了生物学功能评价。

以 PLGA/TCP 为原料，采用 LDM 工艺制成的孔隙体支架，复合 bBMP、bFGF 等生长因子，成功修复了兔桡骨 15 mm 节段性骨缺损和犬桡骨 20 mm 节段性缺损，有望成为一种优异的骨缺损修复材料进入临床。

4.4.2 软骨组织工程应用

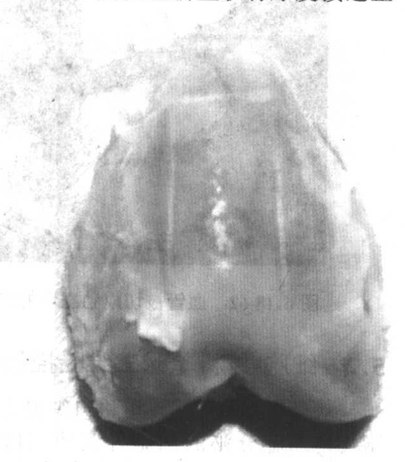
软骨组织是半固态的结缔组织，由软骨细胞和细胞间质组成。在关节软骨内，软骨细胞不多，大约只占组织整个容量的 10%。软骨内没有血管，软骨细胞生存所必需的营养主要靠营养物质在软骨基质内的渗透。由此可知，软骨组织内营养和血供不足，其修复再生能力极弱，认为直径超过 3 mm 的软骨缺损就很难自行修复。

如前所述，组织工程方法包括体内合成和体外培养两条技术路线，体内合成型路线的特点在于活的细胞由体内提供，在支架植入体内后逐步长入其中；而体外培养型技术路线的特点在于支架在植入体内之前就通过细胞/组织培养结合了活的细胞。基于软骨内细胞稀少、营养和血供不足的组织特点，采用体内合成型路线的方法存在不足，特别是对于软骨表层损伤或大面积软骨缺损，体外培养型技术路线具有较大的优势。因此本节采用体外培养型技术路线进行软骨组织工程生物学研究。

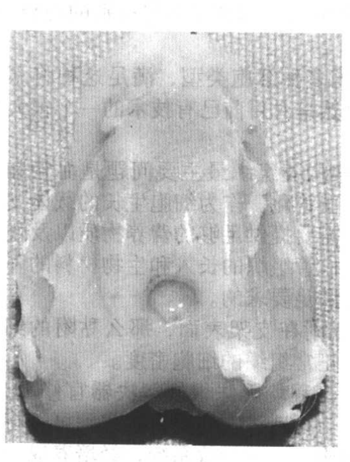
以骨髓基质细胞（MSC）为种子细胞，以骨形态发生蛋白（BMP-2）为生长因子，体外诱导 MSC 向软骨细胞分化。利用 LDM 工艺将 PLGA 制成孔隙体，切割成直径为 4 mm，厚度为 3 mm 的圆柱形支架。将 MSC 诱导成的软骨细胞复合到 PLGA 孔隙体支架上，植入兔的膝关节软骨缺损中，研究其修复软骨缺损的效果。

1）大体观察 24 周时，实验组缺损内充填半透明新生软骨组织，色泽与正常软骨相似，质韧，表面平整，与正常软骨界限不清。对照组缺损内形成的组织颜色苍白，质软，不连续，可推动，为纤维组织，表面不平整，与正常软骨界限明显，缺损未被填满，周围部分软骨变性，但未见滑膜增生（见图 6.18-59）。

2）组织学观察 24 周时，实验组新生软骨厚度接近正常软骨厚度，表面连续、平整，表面细胞基本与关节面平行，深层细胞排列紊乱，有柱状排列的趋势，细胞呈团状，出现陷窝，但较小，与正常软骨细胞有别，基质异染广泛，软骨下骨及潮线恢复正常，与周围软骨连接良好（图 6.18-60a）。对照组缺损仍存在，缺损边缘细胞呈团块状增生，底部为纤维组织，不连续，厚薄不等，高低不平，下方为新生的松质骨小梁（图 6.18-60b）。



(a) 实验组

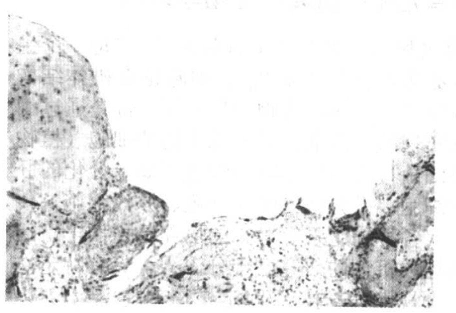


(b) 对照组

图 6.18-59 植入 24 周后的大体观察（清华大学激光快速成形中心和第四军医大学提供）



(a) 实验组



(a) 对照组

图 6.18-60 植入 24 周后组织学观察（HE 染色，150×）
（清华大学激光快速成形中心和第四军医大学提供）

3）结论 在体外将 MSC 扩增、诱导为软骨细胞后，复合到 PLGA 孔隙体支架上并植入兔体内，在新生软骨形成的同时，PLGA 支架被逐渐降解吸收，很好地修复兔关节软骨缺损。

5 细胞-材料单元受控组装

随着新型医学材料、基因技术、分子克隆技术、大规模细胞扩增技术、体外组织构建技术的产生和发展，科学家们开始探索新的更加有效的用以修复组织和器官的方法，方法之一就是细胞直接注射法。

将含有活力的细胞群悬液，输注到受者的组织器官内以修复缺损组织，其方法如图 6.18-61 所示。将患者自身的干细胞直接注射到受损心脏中，就会使血管再生，注射到肝脏中，就可以生产新的肝脏。这为心肌梗塞、心脏病、肝功能丧失等的治疗开辟一条新思路，近几年干细胞技术和细胞微囊技术的发展，科学家将牛的胰腺细胞分离后培养，然后用一种特制的微囊将这种培养好的细胞包裹起来，注入体内，这种细胞由于被包裹起来，避免了与人体细胞直接接触发生的排异反应，能够在人体中长期存活，持续不断地分泌内啡呔，从而达到了治疗癌痛的目的。

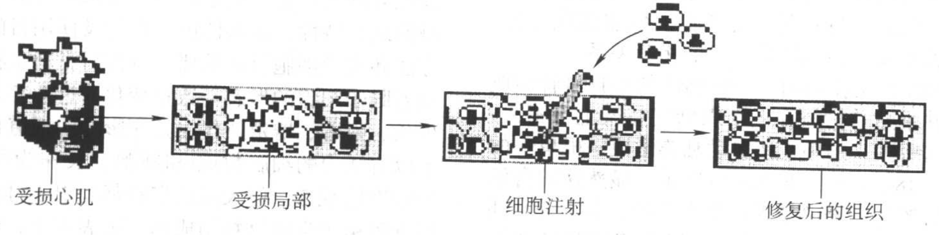


图 6.18-61 细胞注射方法示意图

细胞直接注射法在疾病的初期或者微创期均可以起到一定的效果，但是在晚期或者大面积的缺损，结果往往不是很理想，注入的细胞悬液在其相对应的再生组织完全形成并与周围组织愈合前，可能由于不平衡的受力而移位，渗透到附近的组织，甚至随着体液的循环而流入人体其它部位，引起肿块甚至恶化为肿瘤。

目前，组织工程面临着如下一些问题。

1）比较厚的支架，细胞的迁入和繁殖不是特别的理想，血管的长入受到限制。

2）器官或组织一般包涵多种细胞类型，满足这种将不同的细胞定点排布的需求仍然是对目前已有技术的一个很大的挑战。

3）采用现有的固体支架构建组织最主要问题是血管和组织的长入是单向的，缺乏血管化。作为细胞生长的载体支架，在细胞生长的过程中，需要提供足够的营养物质以及代谢物质的交换，只依靠周围血管组织的长入和生物材料的降解，其时间的滞后性是不能满足要求的。

4）由于首先需要细胞黏附在支架表面，那么黏附的细胞数量必然有限，远远少于正常组织的细胞密度。

细胞直接注入法与组织工程均无法很好解决器官修复，特别是复杂内脏器官的修复与再造。人们很自然想到可否将细胞直接组装成一种三维结构，一种开放系统，经培养成一种类组织前体的生命体再植入体内。应该说这是一条十分可行的技术路线。这就是细胞-材料微滴受控组装。

5.1 细胞-材料单元受控组装的生物学基础

早在 1925 年著名科学家 E.B.Wilson 就说过，“每一个生物科学问题的关键必须在细胞中寻找”。细胞是有机体结构和生命活动的基本单位。一切动植物的生长发育都是通过细胞的增殖与分化来实现的。目前，对来源不同的细胞（植物细胞、动物细胞或细菌）或性质不同的细胞（如未分化的胚胎干细胞、成体干细胞、已分化的组织细胞、原代细胞、传代细胞、肿瘤细胞、各种细胞系等等）的培养已积累丰富经验，细胞增殖和调控的机理的研究已十分深入，具有特定功能和形态的细胞的大规模培养技术/固定化培养/悬浮培养以及高度分化的组织细胞的培养技术基本成熟，这就为我们实现细胞-材料的三维受控组装提供了源源不断的细胞来源。

对于细胞三维组装结构（开放系统）而言，应在结构和形态上，模拟自然的组织结构，即细胞相对于整个结构，在宏观上被排布而定位在确定的位置上，不能有位置的变化；但在微观上，又允许细胞拥有均衡的游走和发展空间。由于细胞在远离循环系统几百微米以上将无法生存，所以，要想实现大尺度的细胞三维结，营养和新陈代谢物的通道成为基本的需求，在结构设计时预留的三谁通道就是组织血管化的预留空间。不同的细胞对于通道大小的需求是不一样的，所以，这些通道可以按需设计并制造。

细胞生物学不仅是孤立地研究一个个细胞器、生物大分子及生命活动现象，在生物学研究中，除了探索细胞的基本生命活动，如生长、发育、分化、繁殖、衰老和死亡等基本规律外，有关细胞自组装、黏结特性、组织的亲和性等特性也开始成为研究的热点，特别是研究它们的发展变化过程，它们之间的相互关系及它们与环境之间的相互关系。

Thompson 等的研究工作表明，将胚胎动脉心脏血管切成独立的心肌环，并紧贴着排放在一个管状支持架上，不久，通过扩散变形，这些独立的环互相自动粘连形成一根单一的心脏血管，如图 6.18-62a 和图 6.18-62b 所示。显然这种自然特性对于人工器官的制造来说是很鼓舞人心的。事实上，胚胎组织本身是一种黏弹性流体，具有较好的流动和扩散特性。以上这个简单的生物学实验为细胞组装提供了一个强有力的证据。根据这个胚胎心血管环扩散实验类推，可以假定如果细胞、细胞团簇或者软组织片断在三维支架中的位置足够近，它们是否会扩散形成一个完整的组织块或管状体呢？

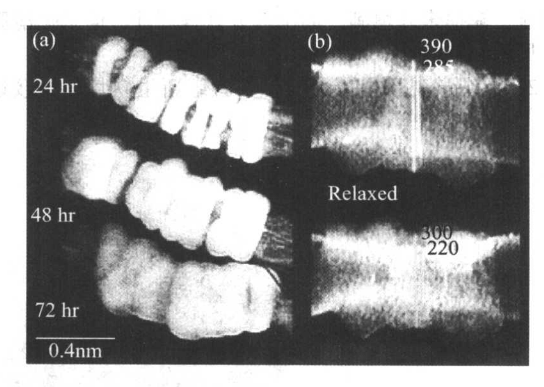


图 6.18-62 血管被切成独立环的扩散黏结生物学实验

5.2 细胞-材料单元三维受控组装的生物材料基础

从材料科学的观点可将组织视为细胞复合材料，它由细胞及其细胞分泌的细胞外基质（ECMs）组成。细胞-ECMs（Extra-Cellular-Matrix）之间存在着动态相互作用，这种作用和细胞-细胞间相互作用共同调控细胞的新陈代谢。分子的 ECMs 的功能在于使细胞集团化或调控组织结构，调节细胞表型如细胞的特异基因表达，它作为生长因子存储器，可通过控制方式将这些因子提供给 ECMs 相邻细胞。因而试图进行组织重建的生物材料必须具有仿细胞外基质的功能[9]，我们称为仿 ECMs 或者类 ECMs 材料。

早期选择生物材料用于人体的原则是，选择具有与所替代组织的性能相配的适宜的综合理化性能，并与宿主之间毒性反应最小的生物惰性材料。80 年代以来，生物活性和生物可降解材料成为研究的热点。生物活性材料的组成能够在生理环境下与机体之间发生反应，生物可降解可吸收材料的应用，使得异体材料最终可以被再生组织代替。这些材料的发展和应用极大地推动了临床医学的发展。

在目前的研究中，生物活性材料和可吸收材料的概念得到统一。通过分子改性，在生物可吸收聚合物中引入对细胞产生特异性反应的组成，从而控制细胞的增殖，分化和细胞外基质的产生。细胞外基质中固有的某些组分如特定的蛋白，多肽如细胞特异性识别因子、黏附蛋白纤维素等和其他生物分子，可以结合到可吸收聚合物表面，为细胞黏附在材料的表面上提供多种功能。这些材料的发展和应用极大地推动了临床医学的发展。

目前可用的生物材料包括：人工生物材料、天然生物材料、特殊生物材料和复合生物材料。具体如表格 6.18-2 所示。

新的生物材料不断涌现、材料植入体内的部位及使用目的日趋繁杂、材料毒性作用的强弱以及材料与机体反应的复杂性等因素，都是通过细胞实验来评价的。根据生物材料本身的理化特性、植入体内的部位及使用目的选择适当的实验方法和实验细胞至关重要。以往对材料生物相容性的评价往往着眼于细胞的形态与数量变化，近几年来研究材料对细胞生长、附着、增殖及代谢方面影响的报道日趋增多，并提出了以有活力的细胞数或/和细胞生长作为材料生物相容性评价标准的观点。但大多数实验都局限于材料表面，将选定的细胞种植于生物材料制成的薄膜表面上，观察细胞的形态和增殖情况，以评价这一材料与细胞的相容性。

表 6.18-2　生物材料及其特点

材料类别		主要材料	主要用途	特点
人工生物材料	金属材料	不锈钢、钛合金、钴合金、镍合金等	骨和牙齿等硬组织修复和替换，心血管和软组织修复	优点：材料持久性强，可永久植入 缺点：生理环境腐蚀造成的金属离子扩散及自身性质的退变
	陶瓷材料	生物陶瓷：氧化铝、氧化锆	肌肉骨骼心血管系统的修复替换，药物释放和传递载体	优点：硬度高，易成型、可制成多种多孔支架结构 缺点：脆性大
	合成材料	聚烃类、树脂类	人工器官构件，如骨、软骨、血管、皮肤、口腔等	优点：成本低、易生产、较好的生物相容性和可吸收性
天然生物材料	蛋白类	胶原、明胶、血清纤维蛋白、聚氨基酸	人工器官、缓释载体	来源广泛，取材方便，毒性低
	糖类	甲壳素	人工皮肤、伤口愈合剂、降低胆固醇的药物	生物相容性好，生物结构完善
	酯类	聚羟基脂肪酸酯	组织工程材料、缓释材料	生物相容性好、生物降解性好
特殊生物材料	半天然	聚乳酸	包装材料、组织工程材料、缓释材料	加工性能、生物相容性好
复合生物材料		聚乳酸－羟基磷灰石复合材料	组织工程支架材料	强度、降解性、多孔度、可加工性结合了天然、人工材料的优点

而细胞在生物材料内部的生长和增殖随着生物学发展的需要，其可性正在不断地被证明。制备血管内皮单细胞悬液并将其与纤维蛋白原溶液混匀，经 10 天培养后血管内皮细胞在纤维蛋白凝胶中能够维持正常的细胞形态而且具有稳定的生长增殖功能，内皮细胞在凝胶中可以迁移扩增，由于提供了立体的生长环境，有形成管状的趋势。图 6.18-63 为种植在透明半固体状纤维蛋白原凝胶中的内皮细胞 1 天后的形态，细胞均匀地分布在材料构成的三维空间中，图 6.18-64 是内皮细胞在凝胶中培养 10 天后的照片。

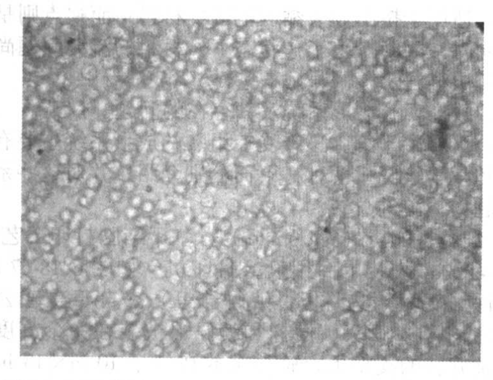


图 6.18-63　种植在透明半固体状纤维蛋白原凝胶中的内皮细胞，1 天后均匀分布在凝胶的三维空间中

这种细胞与细胞之间的相互识别和黏结特性以及材料与细胞之间的融合现象对于创建复杂的三维器官是非常关键的。尤其是细胞在三维空间中的能够生长和增殖，是细胞-材料受控组装的前提和必要条件。由以上分析可知，用于细胞-材料单元三维受控组装的生物材料应具备以下条件：

1）具有很好的生物相容性及可降解性；
2）是水溶性的，从而细胞可以在其液态的环境中生存；
3）对于亲水基质的扩散率必须足够大；
4）高含水率；
5）有可成形性。

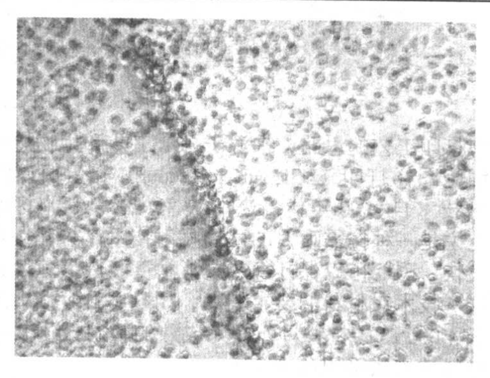


图 6.18-64　内皮细胞在凝胶中经 10 天培养后，呈线性排列生长，形成类似于血管样结构

5.3　细胞组装的国内外研究现状

5.3.1　国外相关研究

（1）细胞打印（cell printing）

美国 Clemson 大学的化学工程师 Boland 和南卡罗来纳医科大学的 Mironov，将 Gutowska 等人在 2001 年提出的热敏感材料及其固化工艺用于细胞直接受控三维组装，提出了称为细胞打印的新工艺。

他们使用的热可逆凝胶无毒、可生物降解，在常温下呈液态，当温度升高到 32℃时，就变成凝胶态。这种特殊的生物材料相当于“纸”，细胞悬浮液相当于“墨”，在成形过程中组织结构被打印在“纸”上面。细胞打印的过程如图 6.18-65 所示。在胶原基底上，首先铺设“纸”，然后打印细胞及其它必要材料，如此反复，一层细胞一层凝胶材料连续堆积成形，就会形成一个三维结构体。整个过程的温度保持在 37℃，以保持凝胶化过程的持续进行。在成形结构体后，再微调成形结构的温度，使凝胶融化，从而形成最终的结构体。

单一内皮细胞经过三维细胞打印，并经过一段时间培养后，细胞聚集成环状的实验结果，如图 6.18-66 所示。



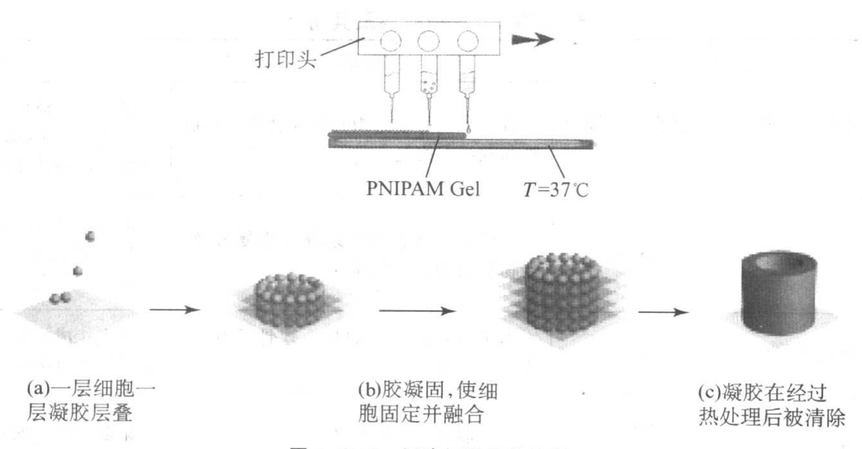


图 6.18-65　细胞打印工艺流程

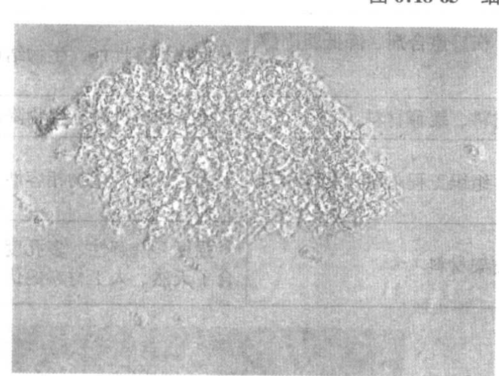
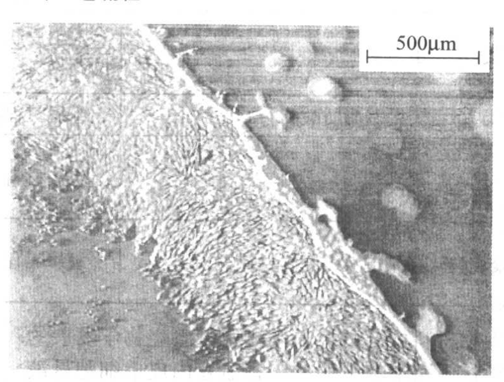



图 6.18-66　内皮细胞经三维细胞打印后的聚集情形

细胞打印工艺的思路，来源于3DP工艺和生物检测技术领域的细胞图样打印（cell pattern printing）和蛋白质阵列打印这两种技术自1990年代以来的快速发展，细胞打印工艺从本质上说是一种按需喷射的微滴喷射技术。其优点在于响应速度较快，因而可以保证高的成形精度和成形速度；而缺点就是这一技术对材料的要求较高，如黏度较大（一般对于黏度大于4 000 cs的材料目前尚无成熟的喷射技术）的细胞外基质材料就无法采用这种技术。

细胞打印工艺在2003年提出后，因其首次尝试了将细胞通过三维打印的方法精确地投放到指定地点，并且改装商业打印机的成本低廉，因而引起了相关领域诸多研究者的重视，目前已有美国的Clemson大学、Arizona大学、Missouri大学和Drexel大学等研究单位开始展开细胞打印工艺的研究。

（2）生物绘图（bio-plotting）

1999年德国Freiburg大学的Landers和Mulhaupt报道了一种可以快速成形天然生物材料水凝胶（明胶，胶原，纤维蛋白等）的新工艺——生物绘图，随后这一工艺由EnvisionTec公司商业化并投入市场，成为第一台投放市场的可成形水凝胶的快速成形设备。

基于快速成形技术中较成熟的FDM工艺，生物绘图工艺的主要改进之一是采用了气动驱动作为压力源，挤压只能在低温下成形的水凝胶材料，从而避免了FDM工艺因为需要熔融而导致材料变性的问题；二是材料的成形环境可以为液体媒介，从而避免材料因为重力和刚性不够而导致的坍塌现象。

生物绘图工艺：挤出材料首先被存放在针管中，然后在气压的驱动下经过内径小至80 μm的喷嘴，挤压进入到绘图媒介（plotting medium）中。在后者的环境下，可以进行物理固化（通过降温或升温）或化学固化（通过化学反应），从而成形较为精细的支架结构。

生物绘图工艺的这些特点使其可以使用多种方法（物理、化学）成形多种生物材料，因而得到广泛的应用，使用这一工艺可成形热可逆凝胶-琼脂和海藻酸盐支架。但是，在细胞直接受控组装中使用生物绘图工艺还未见文献报道。

生物绘图工艺在本质上来源于FDM工艺，是连续微流挤出技术的一种。这种技术的优点在于，对材料的适应性比较广泛，适用于挤出较大黏度范围的材料；而缺点则是速度较慢，同时在间断挤出工作状态下，材料的流涎问题尚未有成熟的解决办法。

（3）国外现有成形系统及其存在的问题

目前可望用于细胞三维受控组装的成形系统主要有细胞打印机和生物绘图机两种，下面分别介绍，并对这些系统存在的问题作简单的总结。

1）细胞打印机（cell printer）　基于细胞打印工艺，Boland和Mironov改装了商用喷墨打印机，如图6.18-67所示，打印组件（喷头，电路板，编码器等）来自于惠普公司的HP660C打印机。喷头，横杆和编码器被装在一个高度可调整的绕轴旋转的支架上，整体被放在一个10 in × 13 in的玻璃板上。原来用来定位纸的橡皮轮可以接触到玻璃板，而通过调整喷头的高度来匹配样品的厚度。喷头，横杆和编码器都装配在一个固定不动的基座上。这一基座的设计也是可以用在多种型号的商业打印机上。喷头在横杆上滑动相当于水平运动，而打印机的进纸操作相当于垂直运动。这一装置被称为细胞打印机。

在他们打印胎牛主动脉内皮细胞和平滑肌细胞的尝试中，细胞密度约为1×10^5个/mL，采用了3 mg/mL的胶原凝胶作为基底，针头产生的微滴的平均直径大约是0.006 in。也就是说平均每滴中含有1.5个细胞，即含有一个或者是两个细胞。细胞打印过程在室温下进行，打印成条形，每个样品用时少于1 min。



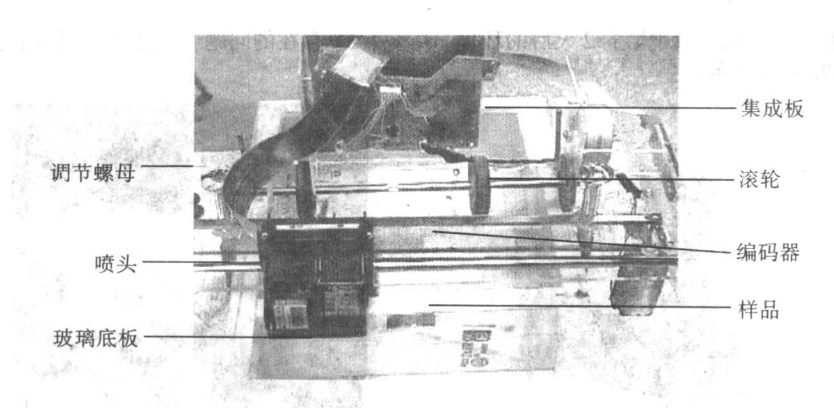
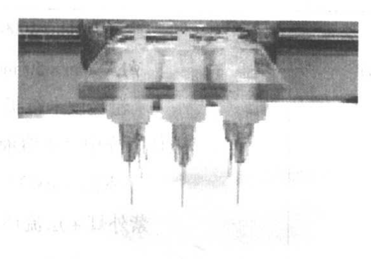
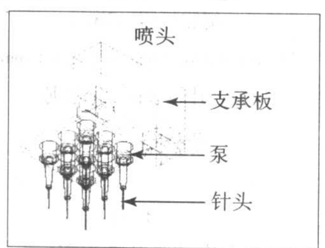


图 6.18-67 Cell Printer 装置图

如图 6.18-68 所示为细胞打印机的喷头阵列示意图。由于某些哺乳动物的细胞直径超过了 100 μm，原有打印机的喷头不再适合，他们重新定制了打印机的喷头阵列。如图所示的喷头阵列包含 9 个针头，每个针头由单独的微量泵提供压力，细胞悬液通过软管经过 Luer Lock 型紧闭装置连接到针头上。针头的直径为 0.006 in，即 152 μm。针头阵列由 Microchip 接口控制器控制，而定位和进纸操作则由打印机原有软硬件控制。





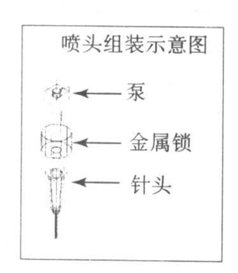


图 6.18-68 Cell Printer 的针头阵列

尽管通常的打印机受限于二维平面，他们的系统致力于实现三维的细胞组装。因此，他们在细胞打印机上采用层层打印的方式，尝试打印出了含有仓鼠卵巢细胞的一个类似面包圈的结构体，如图 6.18-69 所示。从图中可以看出，这并不是一个真正的三维结构体。

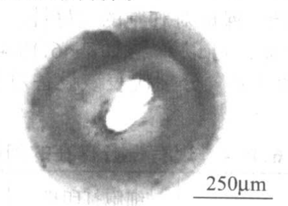


图 6.18-69 细胞打印机打印出的三维结构体

2）三维生物绘图机 基于生物绘图工艺，Landers 和 Mulhaupt 同 EnvisionTec 公司合作，推出了使用这一工艺的商用生物材料成形机——三维生物绘图机（3D Bioplotter），EnvisionTec 已于 2002 年正式将商用机型投向市场。设备外观如图 6.18-70 所示。

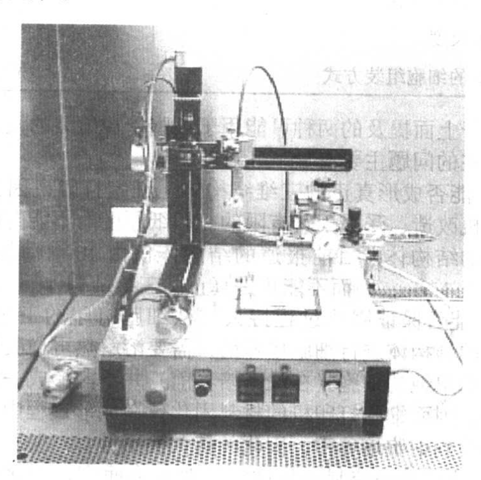


图 6.18-70 3D Bioplotter 的外观

图 6.18-71 所示为三维生物绘图机的设备原理图。他们报道的实验系统是由一个数控铣床改装而来的，铣头被一个由双层金属套筒包裹的玻璃针管所替代，套筒间通热油以防止挤压过程中发生凝胶化而堵塞喷头。针头的直径可以小至 150 μm，此时出丝直径为 350 μm。挤出的压力源来自通过标准 PTFE 封装连接的压缩空气，工作压力在 1.5×10^5 Pa ~ 2.0×10^5 Pa 之间。整个成形空间是在直径 150 mm，高 50 mm 的玻璃培养皿中，培养皿的底板使用粗糙的硬卡纸板。这一设备的主要特点就是成形过程是在液体的绘图介质中进行的，液体的浮力会抵消成形材料的部分重力，这样从一定程度上避免了材料因为重力的原因而在竖直方向上逐渐坍塌的现象。整个设备中的空气流通可以保持在层流状态，而设备的消毒工作则由紫外灯来完成。

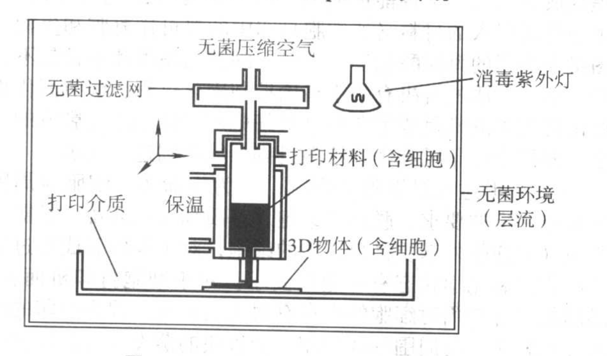
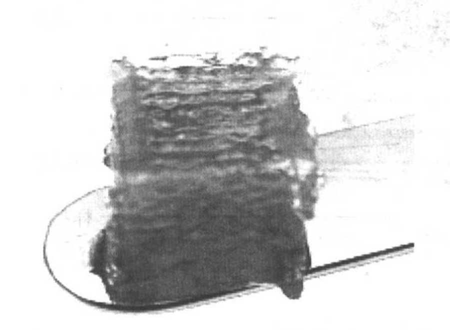


图 6.18-71 Bioplotter 设备原理示意图

目前他们正基于这一设备致力研究细胞与水凝胶材料共混物的直接打印，但是目前还没有相关的文献报道。如图 6.18-72 所示是由 Bioplotter 设备成形的琼脂胶支架，支架成

形后再植入鼠成纤维细胞，置于培养液中培养2天后的环境扫描电镜照片如图6.18-72右侧所示。

3）存在的问题 上述两种设备特点总结如表6.18-3所示：



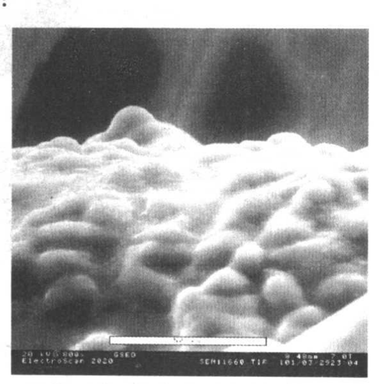


图6.18-72 使用Bioplotter成形的琼脂胶支架和显示细胞贴附的ESEM照片

表6.18-3 Cell Printer和Bioplotter的特点总结

项目	细胞打印机（cell printer）	生物绘图机（bioplotter）
工艺	细胞打印（2001）	生物绘图（1999）
成形空间	254 mm×330.2 mm（高度<1 mm）	ϕ150 mm×50 mm
成形底板	载玻片，表面涂覆胶原	粗糙硬卡纸板
成形环境	暴露于空气中	液体媒介中（水溶液为主）
成形温度	37℃	室温～100℃
消毒方式	（无报道）	紫外灯＋层流环境
压力源	压电/气泡喷射技术或气动	气动
最小针头直径	150 μm	150 μm
细胞尺度	1～2个/滴	（无报道）
采取的细胞组装方式	喷头阵列喷射细胞悬液	细胞和外基质材料混合后挤出

对于上面提及的两种可能用于细胞受控组装的设备，分析其存在的问题主要有如下几点。

1）能否成形真正的三维结构体 细胞打印机因为由商用打印机改造，受限于其有限的打印纸厚度而不能打印出厚度较大的结构体，目前报道的结构体仅由10个薄层构成，厚度小于1 mm，因而不能算是真正的三维结构体。

2）能否保证固化过程持久 从细胞打印的工艺来看，成形后的结构体进行细胞培养前，需要溶解热可逆凝胶留下细胞，而单纯的细胞（在没有培养前）并不能形成一定的几何结构，因而细胞打印机的材料固化仅在成形过程中有效而不能持续到细胞培养中，固化的持久性不佳。

3）能否精确控制固化过程 对成形而言，固化过程是提高成形结构力学性能的必要步骤，但是对细胞培养而言，由固化而引入的材料（如细胞打印中的热可逆凝胶和生物绘图机中采用的海藻酸钠）通常对于细胞的贴附和生长是不利的。这一矛盾的解决有赖于精确控制固化过程，调节固化程度使之达到既满足成形要求又对细胞产生最小限度影响的平衡。而细胞打印机和生物绘图机都不能达到这一要求。

4）成形过程对细胞的影响 作为生命体，细胞对周围环境有一定的要求。脱离了细胞外基质和生长环境，暴露在媒质（类细胞外基质材料）中的细胞，对于媒质和成形过程中的物理和化学状态有一定的要求。对于细胞打印机而言，细胞的水合作用对细胞的生存有很大的影响。因为打印的微滴体积较小，与周围的环境相比会很快的蒸发水分，从而导致细胞失水。而生物绘图机则因为成形媒质本身为水溶液，细胞失水的问题几乎不存在。

5）能否提供无菌环境 生物绘图机设置了紫外灯和层流环境来保证环境无菌，而细胞打印机并没有专门的杀菌消毒装置。但是成形底板方面，前者使用的粗糙硬卡纸可能会在成形结构体中引入粗纤维等杂质，相较而言后者所采用的天然胶原涂层则能够保证对细胞的友好性。

对于这些问题，可以总结如表6.18-4所示。表中的“好”、“一般”和“差”分别代表该设备对某一问题的解决程度。

表6.18-4 现有设备存在的问题

项目	细胞打印机（Cell Printer）	生物绘图机（Bioplotter）
成形真正的三维结构体	差	好
保证固化过程持久	差	好
精确控制固化过程	差	差
成形过程对细胞的影响	差	好
提供无菌环境	一般	一般

5.3.2 清华大学生物制造中心

清华大学在国内率先提出计算机辅助细胞三维组装的科学概念，并开展了系统而深入的研究工作。

要实现细胞和其他生物活性物质在三维空间的精确定点定量分布，并保证其长期的稳定性和功能的表达，需要解决的关键技术问题是：成形结构物力学性能的协调性和开放性；成型过程对细胞的非破坏性；成型过程的稳定性；培养过程中微环境的提供。从材料与制造科学的观点出发，可将组织视同细胞基复合材料的结构体。该复合材料由多种细胞、外基质材料ECMs和生命物质所构成。事实上，细胞和其ECMs构成一个可进行物质和能量交换的开放系统。仅将



大量细胞无序堆砌起来并不能构建具有功能的组织和器官。可见，发展具有可植入性的组织器官的重要步骤是探寻并优化一种三维结构，在计算机控制下实现细胞和 ECMs 的有序统一的空间排布，使其形态和结构满足开放系统要求。

清华大学快速成形实验中心提出了一种基于离散-堆积快速成形技术的细胞直接受控组装技术，将细胞与数种生物相容性很好的水凝胶材料（37 ~ 0℃之间）均匀共混作为原材料，通过控制溶胶/凝胶相转变，实现了细胞-材料微滴的三维受控组装。

由于这一技术的出发点就是要在成形支架的同时结合细胞，因此细胞与材料均匀共混是组装的前提。在 37℃和 0℃之间，细胞功能不受影响，因而可用此温度范围内生物材料溶液与特定的一种或者多种细胞按一定的细胞浓度均匀混合。但是，由于细胞膜由疏水性脂质和膜蛋白构筑，一般溶解于有机溶剂的高分子材料会溶解脂质而破坏细胞膜结构。因此，最好是选择水溶性材料作为基质材料，水凝胶是一种亲水性的大分子交联网络，可以含有大量的水。其优点是具有良好的生物相容性、可控的降解性和细胞亲和性。但其力学性能差，难以实现成形。利用水凝胶材料可以由水溶液转变成凝胶这一特性，通过控制溶胶-凝胶相转变，实现固化成形。

复合材料成分的选择不仅要满足成形的要求，而且要满足成形后三维结构体支架在随着细胞的增殖分化过程中，不断的降解吸收。海藻酸钠是由 α-L-葡萄糖醛酸（G）与 β-D-甘露糖醛酸（M）1，4 连结的嵌段共聚体，具有 MM，MG，GG 三种结构单元，其水溶液是一种电荷密度很高的聚电解质，而且在二价阳离子的作用下可以发生溶胶-凝胶相转变。是一种被广泛用在微囊及组织工程中的天然生物材料。

明胶是胶原的部分变性衍生物，具有很好的生物相容性，当温度将至 35℃以下时形成热可逆性凝胶。利用这一温敏性，将其与海藻酸钠材料共混，得到一种适宜本工艺的共混材料 SAG。通过控制明胶与海藻酸钠的成分配比，来控制细胞增殖和明胶溶出相匹配，随着细胞的增殖和明胶的不断溶出，达到一个平衡状态。特别是细胞与 ECMs 之间的结构上的平衡，从而制造出类组织。

根据成形要求和复合材料配比，有两种不同的成形工艺，即实时不充分固化的工艺和分步固化成形工艺。

1）实时不充分固化成形工艺　实时不充分固化工艺，是在挤出成形的同时实时地定点喷射固化剂，对刚刚成形的力学性能较差的材料实施局部地不充分固化，从而保证材料在成形期间具有足够的力学强度而成形较大、复杂的三维结构，成形后再将结构体整体固化，从而得到形态稳定的结构体。不充分固化即满足了暂时的成形要求，又可以避免由于过度固化而引起的层与层之间不粘接而最终导致无法成形的问题。调节固化程度使之达到既满足成形要求又对细胞产生最小限度影响的平衡。而细胞打印机和生物绘图机都不能达到这一要求。本工艺的优点是可供选择的成形材料范围较广，特别是适宜黏度较小的材料的成形。缺点是由于成形过程工艺路径规划复杂，成形过程所需时间较长。具体的工艺路线如图 6.18-73 所示。

2）分步固化成形工艺　分步固化成形工艺是利用温敏性水凝胶材料的凝胶特性，通过先精确的控制成形环境温度，先成形出暂态的具有一定孔隙率的含有细胞的复杂三维结构体，紧接着将这一容易解体的暂态结构体浸入到特定的交联剂中实现部分或者全部交联固化。复合材料成分的选择不仅要满足成形的要求，而且要满足成形后三维结构体支架在随着细胞的增殖分化过程中，不断的降解吸收。这样，通过分步固化成形，即满足了成形要求，又可以避免由于充分固化而引起的层与层之间不粘接而最终导致无法成形的问题。与实时不充分固化工艺相比较，成形过程易于控制，减少了由于成形过程太复杂而引起细胞被污染的环节。缺点是对于黏度太小的材料或者是不受温度控制而凝胶化的材料，可能无法成形。具体的工艺路线如图 6.18-74 所示。

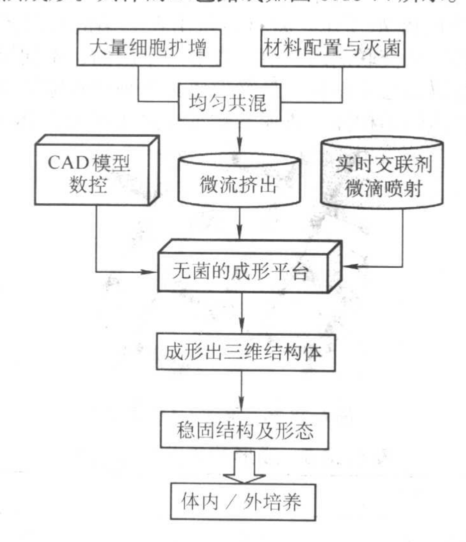


图 6.18-73　实时不充分固化成形工艺

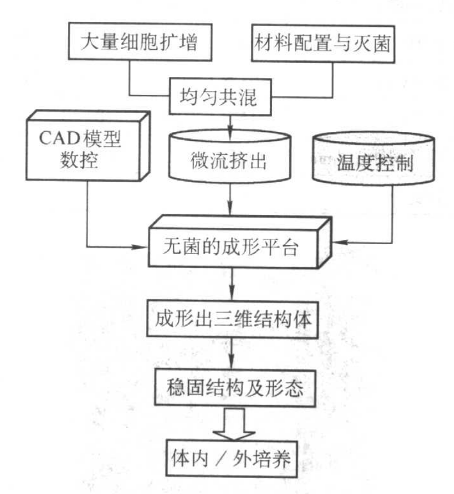


图 6.18-74　分步固化成形工艺

基于原有的生物制造开放平台，采用 AT6400 数控卡驱动，高频电磁阀喷射交联剂，开发了图 6.18-75 所示的细胞-材料微滴三维受控组装设备。该设备集成了上述两种成形工艺，针对不同黏度和浓度的材料，可以选择其中的一种成形工艺或者两种成形工艺的结合。主要有三维微动平台，数控驱动单元，计算机模块，成形室及成形底板，喷头模块，交联剂喷射系统等组成，成形室的设计要考虑温度的控制和无菌的环境的保持这两个因素，喷头模块是单独设计的，主要

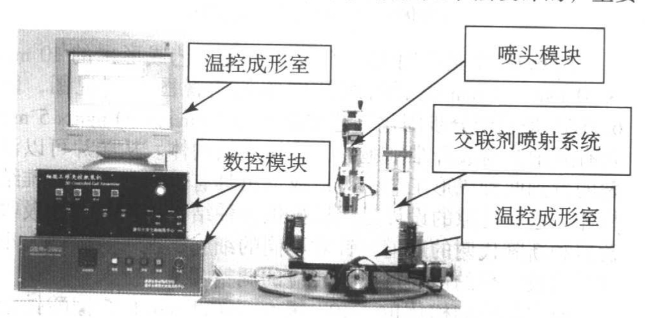


图 6.18-75　细胞-材料微滴三维受控组装设备
（清华大学生物制造中心提供）

由挤压驱动装置，储料管，喷头构成，整个喷头模块固定在 Z 轴上随 Z 轴一起运动。

采用这一设备和工艺，将灭菌水凝胶材料与大量扩增的细胞均匀共混，室温下呈现凝胶态。按照 CAD 模型的层片信息如图 6.18-76 所示。将材料挤出在无菌的成形室内，控制成形温度和交联剂的喷射，成形一个层面，不同层面之间交错叠加再层层并粘接，最终形成具有预设孔隙的含有活的细胞的类组织结构体。成形参数可以总结如表 6.18-5 所示。

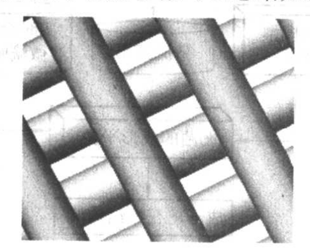
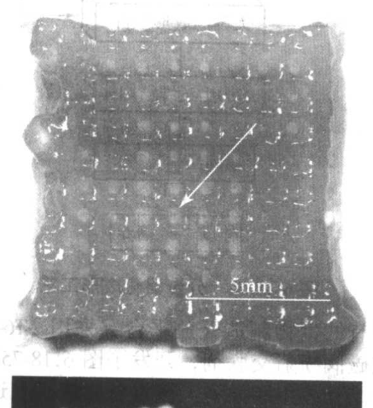


图 6.18-76 层片 CAD 模型

表 6.18-5 成形的工艺参数汇总

项目	1	2	3	4	5
喷头直径/mm	370	270	260	240	200
扫描速度/mm·s^{-1}	5	4	3	2	1
挤压频率/Hz	198	131	105	79	65
材料配比 SA:G	1:0.5	1:1	1:1.5	1:2	1:2.5
交联剂浓度/%	15	10	8	6	4
路径规划（间距）/mm	1.25	1	0.8		
成形室温度/℃	5	12			



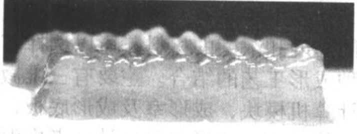


图 6.18-77 类肝组织结构体的俯视图和侧视图
（清华大学生物制造中心提供）

图 6.18-77 是采用实时不充分固化工艺成形出的 10 mm × 10 mm × 3 mm 类肝组织结构体的俯视图和侧视图，图 6.18-78 是采用分步固化工艺成形出的 10 mm × 10 mm × 5 mm 含有肝细胞与成纤维细胞的三维梯度结构体。从照片可以清楚的看到两种成形工艺都可以成形出具有贯通孔隙的三维结构体，这一孔隙的设计是用以提供一种结构体内部细胞吸收营养和新陈代谢的通道。针对不同的细胞，这一空隙的大小以及构成空隙的边界可以做相应的调整。

取成形后结构体的 1/10，用 50 ml0.1 mol/L 柠檬酸钠溶液完全溶解，3 000 r/m 离心后去上清，PBS 冲洗，经染色计数，得细胞存活率在 90% 以上。

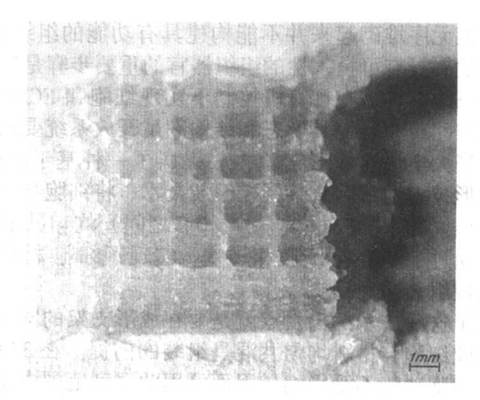


图 6.18-78 含有肝细胞与成纤维细胞的三维梯度结构体
（清华大学生物制造中心提供）

将成形的结构体在 37℃ 的 CO_2 培养箱中加入含有胎牛血清的 DMEM 培养，光学显微镜下观察细胞状态。图 6.18-79 是培养 2 天后的光学显微照片，取样两个成形孔的桥接处，可以细胞的形态保持的很好。

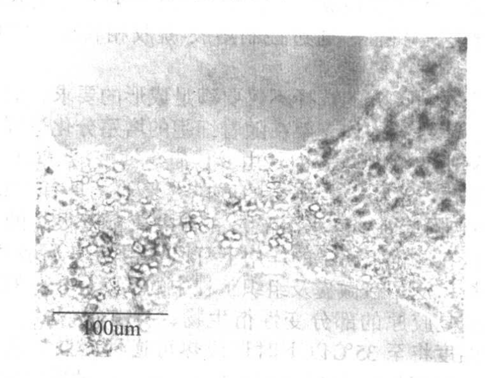


图 6.18-79 培养 2 天后，取样两个成形孔桥接处
（清华大学生物制造中心提供）

将成形的结构体体外培养 3 天后，采用 PI 染色法，通过激光共聚焦检测细胞的活性和外观形态。0.2 μm 的层厚扫描样本，从图 6.18-80 中可以看出，细胞核很清晰。

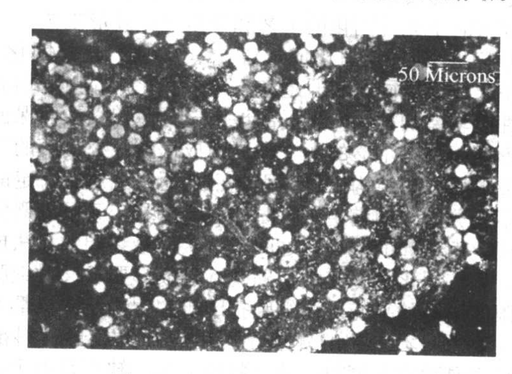


图 6.18-80 激光共聚焦显微照片
（清华大学生物制造中心提供）

图 6.18-81 是培养 5 天后，采用抗原抗体染色法，检测细胞分泌的白蛋白，放大倍数为 200。可以看出，细胞的骨架形态保持的很好，而且有少量的白蛋白开始分泌。

图 6.18-82 是类肝组织结构体培养 10 天后的光学显微照片，可以看到，细胞体积明显增大，出现大而圆的单个、双个甚至多个细胞核，胞浆丰富，部分细胞处于分裂相；细胞数量明显最多。

图 6.18-83 是培养 7 天后的类心肌组织切片（6 μm）HE 染色，取样一个完整的成形孔的照片（放大倍数为 100）。图



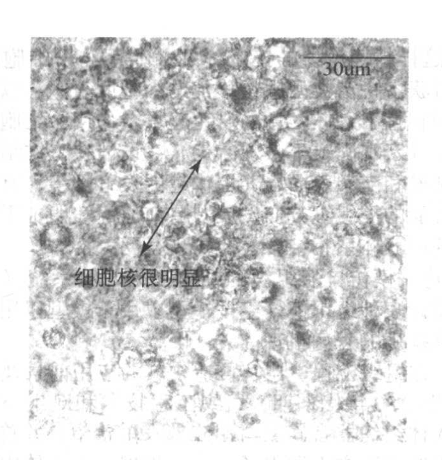


图 6.18-81　培养 5 天抗原抗体染色的显微照片
（清华大学生物制造中心提供）

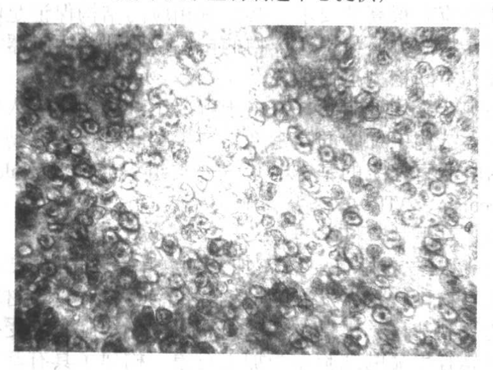


图 6.18-82　培养 10 天后的光学显微照片
（清华大学生物制造中心提供）

6.18-84 是取样成形孔附件放大 200 倍的照片，可以明显的看到细胞的分裂相。实验结果说明，组装成形的这种模拟人体组织结构的类组织前体，不会引起细胞的不适应状态，能较高效率的确保细胞的生存、分裂和分化。

另外，对软骨细胞、成纤维细胞和内皮细胞也进行了上述细胞受控组装实验，体外培养后，细胞的形态保持的很好，有明显的增殖分裂。

目前的研究工作主要是关注于哺乳动物细胞挤出成形后细胞的存活性问题，进一步的研究着重材料设计、工艺完善，组装成形的软硬件设计和支撑环境的完善，多喷头设备的开发以满足几种细胞的组装成形，组装成形后的细胞生物学问题的发现与解决，以及应用于临床前的动物实验和评价等。以用于修复组织器官，特别是复杂内脏器官。

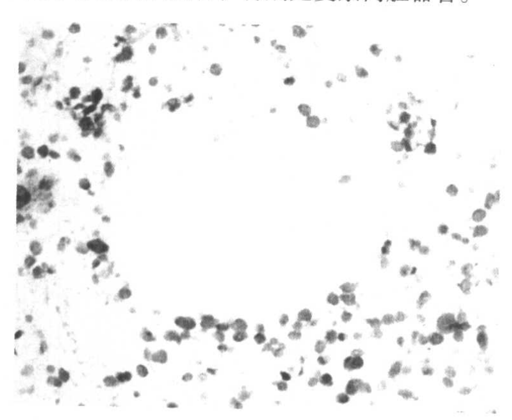


图 6.18-83　组织切片照片（取样成形大孔 × 100）
（清华大学生物制造中心提供）

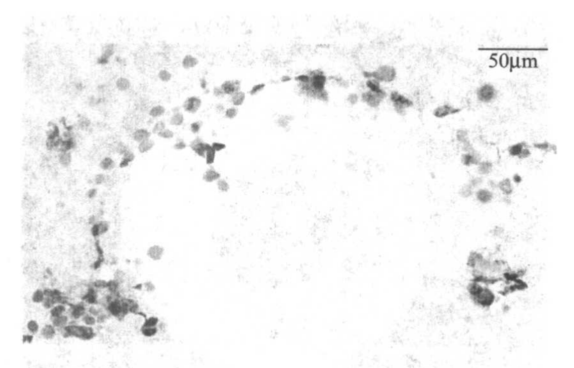


图 6.18-84　组织切片照片（取样成形大孔附件 × 200）
（清华大学生物制造中心提供）

图 6.18-85 是具有双喷头的细胞 – 材料微滴三维受控组织设备Ⅱ，这一设备集成了更好的控制和成形能力。图 6.18-86 和图 6.18-87 是基于设备Ⅱ成形的由壳聚糖与明胶共混作为成形材料的三维结构体。



图 6.18-85　细胞 – 材料微滴三维受控组装设备Ⅱ
（清华大学生物制造中心提供）

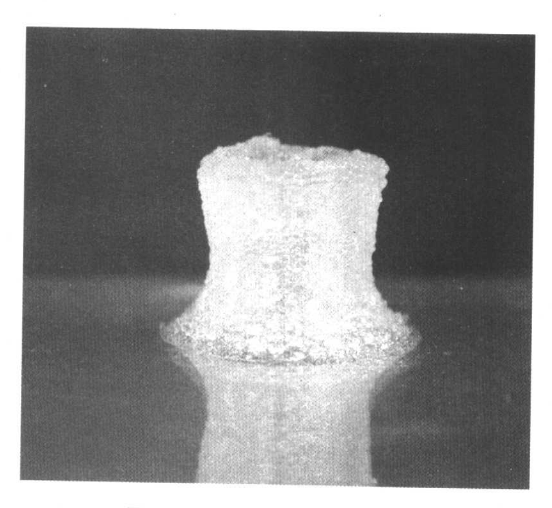


图 6.18-86　由壳聚糖与明胶共混成形的三维结构体
（清华大学生物制造中心提供）



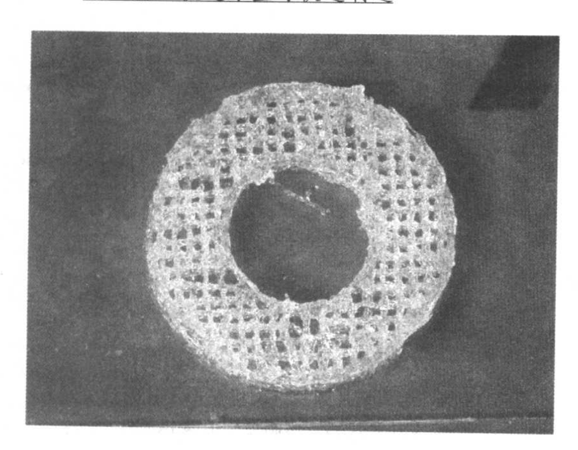


图 6.18-87　由壳聚糖与明胶共混成形的三维结构体
（清华大学生物制造中心提供）

5.4　细胞受控组装的发展及应用前景

（1）在细胞生物学、分子生物学研究上的意义

用细胞三维受控组装技术，将不同的细胞、细胞外基质和生长因子在一个较短的时间内放置在模拟活体内的特定位置上，在细胞生物学、分子生物学上具有以下意义。

1）可以在体外研究细胞和细胞外基质的相互作用在维持细胞的增殖、分化、代谢和功能发挥等方面的作用。在三维体系里，包含在细胞外基质中的细胞行为直接受细胞－细胞或细胞－基质相互作用的控制。细胞分裂、分化和迁移在很大程度上依靠细胞和细胞外基质的相互作用，三维结构对维持细胞的长期存活和功能的发挥起重要作用。一方面，在这构建的三维体系中，与平面的培养体系不同，细胞的微环境类似地体内，细胞被细胞外基质和其他的细胞所包围；另一方面，有孔隙的三维结构有利于细胞的营养物质和代谢废物的交换，以及细胞环境间进行信息物质的交换。这样的体外模型，通过改变细胞的排布位置和生长因子和细胞的信号分子在特定过程中所起的具体作用，从而研究细胞的增殖、分化、代谢的机理。

2）这样精确设计的三维体系，如用在干细胞的分化方面，将对获得特定类型用物移植的细胞或组织，以及干细胞分化机制和整个人体发育的研究起重要作用。细胞被人工地空间排布（宏观固定，微观游走）在设计在三维结构中，获得了较贴壁和支架表面培养更优越的发育环境，有利于向表达特定功能的类组织方向发展。目前研究表明，干细胞只有和三维的培养体系相结合才能实现其巨大潜力。

3）这一模仿自然组织的细胞三维开放系统（环境）可以用来设计多种组织体外生理模型以用于模型以用于药物开发和研究疾病的发病机理。

（2）在组织工程、器官再造领域的应用前景及意义

20 世纪 80 年代末期，组织工程技术和诞生与兴起，为病损的人体组织器官修复与治疗带来了希望，并首先在结构性人体组织再造方面取得了突破性进展。而人体内脏器官多为代谢性器官，其组织必须达到足够大的体积才具有功能，对血液供应有很高的要求。必须有相应的结构保证足够的氧气、营养物的供应与代谢产物的排泄。此外，内脏器官的细胞组成和空间构型也更加复杂。

细胞三维受控组装技术由于解决了细胞团簇工人空间排布以及大结构中细胞的高密度均匀生长问题，将有助于人工构建内脏器官组织的基本雏形——类组织前体（Analogy Tissue Precursor，ATP）。

（3）对于制造科学的意义

制造科学的发展要顺应加工对象——材料的变化，21 世纪是生物科技将大发展的世纪。生物材料和生命材料的加工制造为制造科学提供了新的发展机遇。细胞三维受控组装技术将具有生命的细胞作为加工对象，构建了具有基本生理功能的人造结构体，预示了制造科学的基本原理和方法仍然适用于生命材料的加工成形，而且能为生命科学提供极大的帮助。

编写：颜永年（清华大学）
熊　卓（清华大学）
刘海霞（清华大学）

第19章　快速成形与快速制造技术的精度和表面质量研究

在快速成形制造技术的研究中，有关原型或零件的精度和质量问题占据重要的地位。由于RP和RM成形工艺还在不断地发展与完善之中，分析其工艺中的误差来源，控制影响精度和表面质量各种因素，改进成形工艺和数据处理软件，是快速成形和快速制造技术发展中的主要问题。

1　快速成形误差的主要表现形式

在机械零件设计时要进行尺寸标注和公差标注，包括尺寸公差、形位公差和表面粗糙度等，这实际上即反映了零件的应用场合对该零件各个方面的基本要求，在大多数场合下仅仅有尺寸公差要求是不够的。快速成形的工件也一样，也需要从多方面对其进行要求；快速成形的工件由于受其工艺影响，有些工艺（如二维喷射光固化）衡量精度的概念与一般零件的要求不同，它以分辨率来表示其成形的精度，而且可能每个方向上分辨率都不同。快速成形件的误差可归纳为尺寸误差、形状误差、表面误差和分辨率四种。

1.1　尺寸误差

由于多种原因，成形件与CAD模型相比，在 X、Y 和 Z 三方向上都可能有尺寸误差。为衡量尺寸误差，应沿成形件的 X、Y 和 Z 三方向分别取最大尺寸，测量其绝对误差与相对误差。目前快速成形设备厂商大多数提供这类数据，不过有些厂商给出绝对误差的范围，它指的是在设备的成形尺寸范围内原型所能达到的精度；有些厂商觉得绝对误差不能反映造型的真正精度，一般提供在规定尺寸范围内能达到的精度（如±0.1 mm/100 mm，它表示原型尺寸在100 mm以下时能达到的精度是±0.1 mm，但如果原型尺寸变大，误差也会加大），这在某种意义上规定了相对误差。

目前许多快速成形厂商提供的成形精度数据往往是制造厂商根据自行设计的、一定形状大小的标准测试件测量所得。然而，这些所谓的标准测试件并无统一标准，也未得到快速成形行业的公认，不一定适合所有快速成形工艺，所以只能作为一种相对比较的依据，而不能据此衡量其真正的精度水平。

1.2　形状误差

快速成形可能出现的形状误差主要有：翘曲、扭曲、局部缺陷、特征遗失和面轮廓形状误差等。其中，翘曲误差应以工件的底平面为基准，测量其最高平面的绝对和相对翘曲变形量。扭曲误差应以工件的中心线为基准，测量其最大外径处的绝对和相对扭曲变形量。这几种误差主要是由于成形过程中各种原因引起的工件变形造成的。局部缺陷和特征遗失两种误差可以用其数目和尺寸大小来衡量，局部缺陷多来源于成形工艺的不成熟和不完善，特征遗失主要是因分层制造的原理和工艺步骤所引起的。实际上，如果形状误差较大，则不能再称之为误差，而应称之为缺陷，成形件将视为废品。面轮廓形状误差测量比较麻烦，在国际国内标准中，至今没有规定面轮廓形状误差的定义和评定方法。

球度误差是面轮廓形状误差的特例，球面表面形状误差定义为：球面是由无数圆心相同、半径相同的圆包络而成，此球面为一理想球面；不球度是指包含球面和两个同心球的半径差值。球体表面形状误差由不球度表征。由于这两特殊球面球心的不同确定方法，依据ISO，以最小二乘圆和最小区域法来评定圆度，由于球体表面形状误差与圆度误差的类似性，国际上比较认同四种评定法则：①最小二乘球法LSS；②最小外切球法MCS；③最大内接球法MIS；④最小半径法MRS。

随着计算机技术、电子技术和精密机械技术的发展，现在已经出现一整套集成系统（包括三坐标测量机和专用数据处理软件）可以来评测面轮廓度，而且有许多研究面轮廓度误差和球度误差的算法，应该说评测面轮廓度仍然是一个比较复杂而待完善的问题。目前快速成形研究方面几乎没有这方面的研究，快速成形研究工作者可以借鉴目前研究的成果，在快速成形件的形状误差上建立自己的标准。

1.3　表面误差

在机械设计中，表面粗糙度的定义是指零件的加工表面上具有的较小间距和峰谷所组成的微观几何形状特性，见图6.19-1。它是由于加工方法、机床的振动和其他因素所形成的。表面粗糙度参数有三种评价指标：轮廓算术平均偏差 R_a；微观不平度十点高度 R_z；轮廓最大高度 R_y。通常优先选用轮廓算术平均偏差 R_a。在取样长度内，在被测方向上，轮廓线上各点到中线距离的绝对值的算术平均值，称为轮廓算术平均偏差 R_a，如图6.19-1所示，即：

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |y(x)|\,dx\text{，或近似为：}R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i| \tag{6.19-1}$$

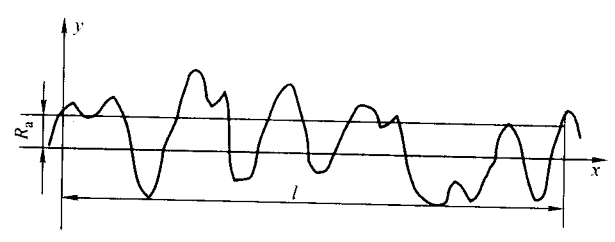


图6.19-1　轮廓算术平均偏差 R_a

快速成形的表面误差有台阶、波浪和粗糙度，都应在打磨、抛光和其他处理前进行衡量。其中，台阶误差常见于自由曲面处，它应以差值 Δh 和 ΔL 来衡量，如图6.19-2所示。波浪误差是指成形件表面的明显起伏不平，应以全长 L 上波峰与波谷的相对差值 $\Delta h/L$ 以及波峰的间距 ΔA 来衡量。粗糙度应在成形件各部分的侧面和上下表面进行测量并取其最大值。表面误差主要起因于成形原理和工艺本身的局限性。

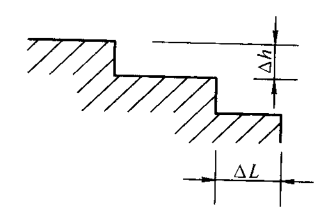


图6.19-2　台阶误差示意图

1.4　分辨率

在计算机的领域里，所有的图像均是由许多的小方点所

构成，并以矩阵的方式排列。pixel 是由 picture 和 element 这两个英文单词所组成，是用来计算图像大小的一种单位。如同摄影的相片一样，计算机的图像也具有连续性的浓淡色调；若把图像放大数倍，会发现这些连续的点其实是由许多色彩相近的小方点所组成，这些小方点就是构成图像的最小单位“像素”（pixel）。

dpi 原是印刷上的计量单位，是指每平方英寸上所印刷的网点数（dot per inch），但在计算机与印刷技术结合，数字信息输入、输出设备迅速发展的同时，已将其用来表示数位图像的解析度。但更确切的说法应该是 PPI，即 Pixel Per Inch。

快速成形工艺可视为三维立体印刷，所以有些快速成形设备（如 3D Systems 公司的 Thermojet 的熔融阵列喷射和 Qudra 的二维喷射光固化）提供的精度单位是 dpi。一般来说 dpi 数值越高，设备能提供的造型分辨率越高，也就是说精度越高，但如果材料不同，可能会导致误差。分辨率另一个作用就是衡量快速成形设备造型的最小尺寸或微结构的能力。

2 快速成形工艺中的误差分析

2.1 快速成形工艺的误差来源

2.1.1 CAD 模型离散化的离散误差和缺陷误差

电子模型域（以三维 CAD 模型为特征）的功能是在计算机中建立用于精确描述设计构思的计算机模型，实现概念模型到电子模型的转换手段主要是 CAD 造型软件。常用的 CAD 数据格式有 IGES、VDA - FS、DXF、UNIVERSAL FILES 等。CAD 模型的准确性（如模型表面法向矢量的正确性）和精确性（如模型尺寸和形状精度等）将直接影响到物理模型的加工精度、质量和加工成本。离散模型的功能是将 CAD 模型离散成为特征参数模型。其特征参数包括：①三维面片模型，如 STL 文件、CFL 文件等；②二维层片模型，如三维面片模型经过分层后得到的 CLI 文件。

在 CAD 模型离散为三维面片模型时，将产生离散误差和缺陷误差。为保证成形的精度，离散误差可通过用户设定加以控制，具体数值可根据文件容量（或后期处理时间）的大小加以平衡；另外，在实际应用中，用户往往不顾快速成形技术中“加工刀具”如激光光斑、喷头直径等有限尺寸仅为 0.2 ~ 0.5 mm 的限制，而希望尽量小的离散误差，殊不知此时“加工刀具”的尺寸已可能包括多个三角形面片，导致更多无用的加工信息。

图 6.19-3 是 STL 模型的离散误差的示意图。STL 文件是对原 CAD 模型进行表面网格化处理而得到的，由图可见，它的实际误差比由三角形弦高表示的给定误差要大。目前一般将此离散误差设为 0.01 mm，如图 6.19-4 所示。在人们对 RP 原型进行打磨处理时，如不考虑离散误差的特性，将给物理原型带来更大的误差。

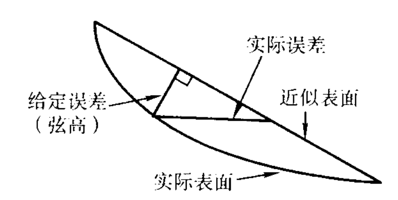


图 6.19-3 STL 模型的离散误差

由于 STL 文件的产生和存储方式不太完善，从而造成了 STL 文件有许多缺陷误差存在，例如数据冗余和拓扑错误等。在产生 STL 文件时，由于 CAD 模型或人为的原因，会出

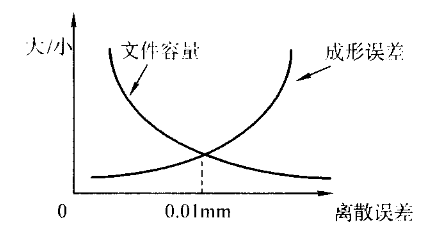


图 6.19-4 离散误差的选取

现一些错误，主要是拓扑信息的丢失引起的。CAD 实体模型造型系统中经常采用构造实体几何（CSG）模型，通过一些简单形体（体素）的组合来表示复杂的形体，但如果未进行求交运算，则造成一个物体延伸到另一个物体，结果产生的 STL 文件是不正确的。另外要求实体模型在转换前必须为正则形体，不能有多余或不足的点、边、面等，以保证该模型转换生成的 STL 文件不出现歧义问题。如果 CAD 模型是表面模型，由于它是由多个曲面片（patches）集合而成，往往会因为小的曲面片丢失而造成空洞，在转换成 STL 文件时会造成较大误差。

在很多情况下，RP 设备接受的往往是已经转换好的 STL 文件而不是原始的 CAD 模型，而由于拓扑错误使得 STL 文件往往存在裂缝、空洞、悬面、重叠面和交叉面等缺陷，使分层后出现不封闭的环和歧义，由这些缺陷造成的误差称为缺陷误差。缺陷误差有时会给成形过程带来更为严重的误差，因此必须检验 STL 文件的正确性并修补不正确的 STL 文件，以消除缺陷误差。

由于分层都有一定厚度，会在成形后的零件表面产生“台阶”现象，这会造成一定的表面误差，称为“台阶误差”，如图 6.19-5 所示。所以对于原型进行打磨、抛光等后处理时，在台阶所在处需给予特殊的注意。对所有的 RP 成形工艺，完全消除“台阶误差”是不可能的，这是由 RP 的离散 - 堆积成形原理所决定的。采用不同的分层厚度，零件表面质量也不相同，一般来说，分层厚度越小，零件表面产生“台阶”越小，最后成形零件的表面质量越高，但分层处理时间及成形加工时间也越长；相反，分层厚度越大，零件表面产生“台阶”越大，最后成形零件的表面质量就越差，但分层处理时间及成形加工时间较少。由于成形工艺及材料厚度的限制，分层厚度也不能太小，比如 LOM 工艺，成形材料为片层材料，有一定厚度，分层处理时层厚最好能与成形材料的厚度匹配，这样就给出了最小分层厚度。对于 SL 工艺，分层厚度值可选得更小。

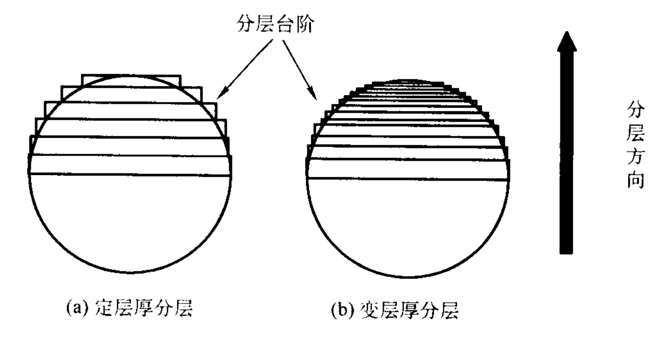


图 6.19-5 分层在曲面表面产生台阶

2.1.2 成形过程中产生的误差

一般快速成形的原型精度约为 0.1 mm，而从离散模型参数的误差分析可知，经过离散模型的误差为 0.01 mm，说明误差经过成形后，增大约一个数量级。因此，成形过程中产生的误差是主要误差来源。

成形装置中的硬件主要包括：平面扫描系统、Z 向进给系统、测高器、送料系统、喷头、激光系统等。

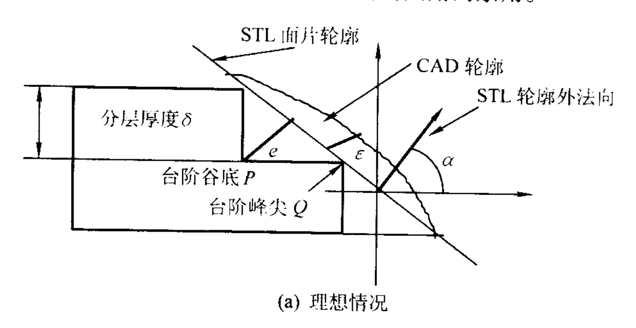
测高器的作用是在系统分层加工每一层后实时检测当前层的高度。Z 向进给系统根据分层加工数据，每加工完一层后向下进给一个固定的层厚高度，但加工过程中由于材料堆积以及热压辊对材料的作用的影响，使得已加工材料的高度与零件当前的实际高度存在误差，如果不对材料当前高度进行实时检测，经过上百或千层加工后，误差的积累可能达到几毫米。因而，需要测高器对加工零件的当前层进行高度检测，当零件当前高度与实际零件的高度发生偏差时，监控软件系统根据测高器检测的误差值，控制 Z 向工作台进行高度修正，并基于实时分层加工原理，选择对应于实际高度的层面加工信息继续分层加工。从而，保证加工的原型的 Z 向误差小于 0.05 mm。

2.2　快速成形技术的误差模型

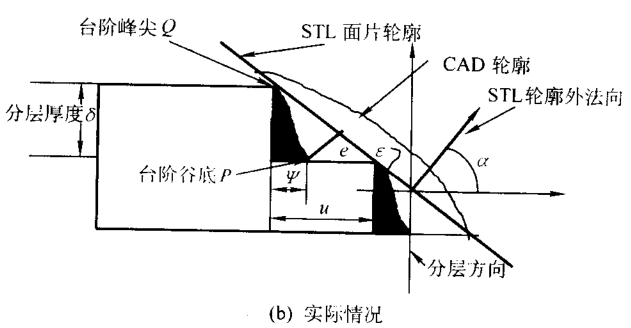
对于一种加工技术，如切削加工技术、电加工技术等，只有建立了误差模型，才能对该加工技术的误差进行有效的控制，从而保证这种加工方法的加工精度和表面质量。对于快速成形技术，从一个 CAD 模型到制造成物理原型后，只是通过打磨等后处理方式使原型表面光顺，在误差或精度上则没有一个定量的判断依据，则不能最终解决其加工精度。无论从加工技术的完整性、与用户的交互性（如对用户所做的制造质量的承诺）等方面来看都是一个缺憾，并且大大影响快速成形技术的推广与应用。综上所述，建立快速成形技术的误差模型确实是非常重要的。

2.2.1　二维误差模型

图 6.19-6a 是快速成形技术获得的理想物理原型，图 6.19-6b 是实际物理原型的二维误差模型。图中，ε 是 CAD 表面离散化的弦差，即离散误差，α 是 STL 面片的轮廓法向与分层平面的夹角，或与分层方向的夹角的余角。



(a) 理想情况



(b) 实际情况

图 6.19-6　物理原型的二维误差模型示意图

对于二维误差模型，给出台阶误差的定义为：台阶误差是指台阶的谷底与峰尖之间在 STL 面片轮廓的法向之间的距离，图 6.19-6 中的 e 是此时的台阶误差。物理原型的表面粗糙度可近似等于 e。

由图 6.19-6a 可得：

$$e = -\delta\sin\alpha \tag{6.19-2}$$

即

$$e = -\delta\tan\alpha\,(1+\tan^2\alpha)^{-1/2} \tag{6.19-3}$$

图 6.19-6 中表示的是 STL 面片轮廓的外法向为正时的台阶误差，此时的误差是负向台阶误差；而当外法向为负时，可以验证 e 的表达式不变，只不过 $\tan\alpha$ 值是负值，此时的误差是正向台阶误差。

在理想情况，在分层厚度 δ 一定，分层方向和分层平面确定的条件下，STL 文件在分层后产生的误差 e 只与 STL 表面的外法向与分层平面的夹角 α 的正切有关。见图 6.19-7。

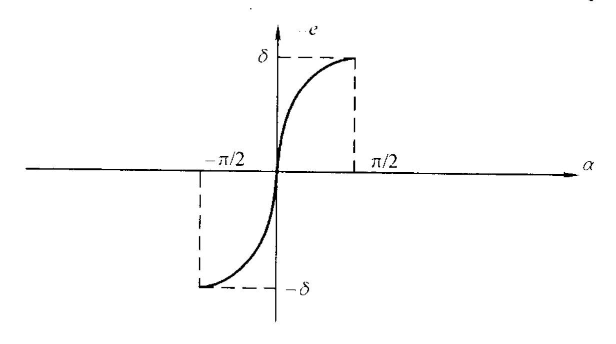


图 6.19-7　理想物理原型二维误差中 $-e$ 与 α 的关系

由图可以看出：

1）当 $0<\alpha<\pi/2$ 时，$(-e)$ 随着 STL 表面法向与分层平面夹角 α 的增大，而正弦增大；$\alpha=\pi/2$ 时，e 达到最小值 e_{min} 且等于分层厚度 $-\delta$，此时 e_{min} 为负向最大台阶误差。

2）当 $-\pi/2<\alpha<0$ 时，$(-e)$ 随着 STL 表面法向与分层平面夹角 α 的增大，而正弦增大；$\alpha=-\pi/2$ 时，e 达到最大值 e_{max} 且等于 δ，此时 e_{max} 为正向最大台阶误差；

3）当 $\alpha=0$ 时，误差 $(-e)$ 为 0，即此时零件原型表面是与分层平面垂直的平面，即直壁平面。

由于上述分析没有考虑成形参数域和物理模型域中的系统误差、"加工刀具"的切口特征、CAD 到 STL 表面离散化时产生的离散误差 - 弦差，因此其结果与实际 CAD 模型表面的实际误差仍有较大差别。

图 6.19-6b 是实际物理模型二维误差的情况。这里，以 LOM（SSM）工艺为例，把实际激光切口误差 ψ（对于某一种快速成形工艺来说，切口误差 ψ 基本上是不变的）和 CAD 到 STL 表面离散化时产生的离散误差 - 弦差 ε 引入，可得：

$$\frac{e'}{e} = \frac{u-\psi}{u} \tag{6.19-4}$$

$$u = \delta\tan\alpha \tag{6.19-5}$$

联立式（6.19-3）、式（6.19-4）、式（6.19-5）等，可得：

$$e' = -(\delta\tan\alpha-\psi)(1+\tan^2\alpha)^{-1/2} \tag{6.19-6}$$

-e
$(\delta^2+\psi^2)^{1/2}$
O
$-\pi/2+\beta$
β
$\pi/2+\beta$
α
$-(\delta^2+\psi^2)^{1/2}$

$$\beta = \arcsin\frac{\psi}{\sqrt{\delta^2+\psi^2}}$$

图 6.19-8　实际物理原型的二维误差 e 与 α 的关系



为得到实际CAD模型与实际物理原型的误差，应引入CAD表面离散化的弦差 ε，而"加工刀具"的切口误差 ψ 的引入，即考虑了RP的系统误差。由此可得：

$$e = e' - \varepsilon \frac{\sin\alpha}{|\sin\alpha|} \quad (6.19\text{-}7)$$

$$e = -\left[\varepsilon \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha} + (\delta\tan\alpha - \psi)(1+\tan^2\alpha)^{-1/2}\right] \quad (6.19\text{-}8)$$

式（6.19-8）称为二维模型的误差公式。此式表明，误差 e 与分层厚度 δ、切口误差 ψ（反映了系统误差）、STL表面法向与分层平面的夹角 α、以及CAD模型的离散误差 ε 有关。当 ε 为零时，α 也一定为零，即此时CAD模型表面的外法向与分层方向垂直，典型的例子是立方体。此时物理原型的误差为 $-\psi$；如果数控代码生成软件中考虑了光斑补偿，则物理原型的尺寸误差只与数控系统的精度有关。

一般情况下 ε 不为零时，通常给定的离散误差 ε 值为0.01 mm。此时CAD模型中有曲面或斜面。当分层方向确定时，根据STL文件中三角形面片的法向与分层平面的最大夹角 α，可以得到物理原型的最大台阶误差 e_{max}。最大台阶误差 e_{max} 包括最大正向台阶误差和负向台阶误差，根据式（6.19-8）可知其代数值均为 $\delta+\varepsilon$。

2.2.2 三维误差模型

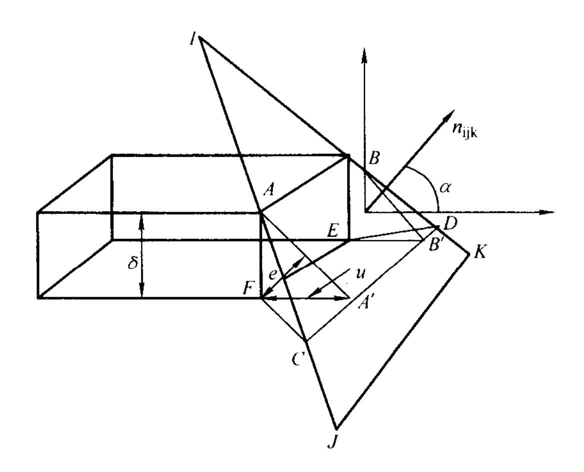


图6.19-9 三维误差模型中的台阶误差示意图

图6.19-9为STL文件中某一三角形面片 IJK 的局部三维误差示意图。由图可知，三角形 IJK 中的 $ABDC$ 区域所对应的体积误差 $V(e)_{ABDC}$ 为五面体 $ABDCFE$ 的体积。即 $V(e)_{ABDC}=V_{ABDCFE}$，而 V_{ABDCFE} 由 $V_{A'FCA}$、$V_{B'EDB}$、$V_{ABB'A'FE}$ 三部分组成，因而可得：

$$\begin{aligned} V(e)_{ABCD} &= V_{A'FCA} + V_{B'EDB} + V_{ABB'A'FE} \\ &= (1/6)\delta u l_{A'C} + (1/6)\delta u l_{B'D} + (1/2)\delta u l_{AB} \\ &= (1/6)\delta u(l_{A'B} + l_{B'D} + l_{AB}) + (1/2)\delta u l_{AB} \quad (6.19\text{-}9) \end{aligned}$$

因为 $u=\delta\tan\alpha$，$l_{AB}=l_{A'B'}$，$l_{CD}=(l_{A'B}+l_{B'D}+l_{AB})$ 代入式（6.19-9）可得：

$$V(e)_{ABDC} = (1/6)\delta^2\tan\alpha l_{CD} + (1/3)\delta^2\tan\alpha l_{AB} \quad (6.19\text{-}10)$$

一般情况下，分层厚度与三角形面片相比很小，如果对STL文件的所有三角形面片上利用式（6.19-10）进行三维误差的累加计算，则可以得到STL模型的三维误差［即体积误差 $V(e)$］，如下式：

$$V(e) = (1/6)\delta^2\sum|l_{CD}\tan\alpha_i| + (1/3)\delta^2\sum|l_{AB}\tan\alpha_i| \quad i=1,2,\cdots N \quad (6.19\text{-}11)$$

式中，N 表示STL模型的所有三角形面片的个数。

进一步计算可得，三维误差值为：

$$V(e) = (1/2)\delta_2\sum|l_i\tan\alpha_i| \quad i=1,2,\cdots N \quad (6.19\text{-}12)$$

式中，l_i 表示所有分层截面与第 i 个三角形面片的交线长度。

根据式（6.19-12）可以求得STL文件的平均台阶误差 $e_{平均}$：

$$e_{平均} = \frac{V(e)}{S_{STL}} \quad (6.19\text{-}13)$$

式中，S_{STL} 是STL文件所有三角形的面积和。

在此三维模型中，l_i 表示所有分层截面与第 i 个三角形面片的交线长度。根据前面的分析可知，由于台阶误差存在正向和负向之分，因此在公式中加上绝对值保证代数和相加。图6.19-10给出了由理想物理模型的三维误差求平均台阶误差 $e_{平均}$ 的软件算法流程图。

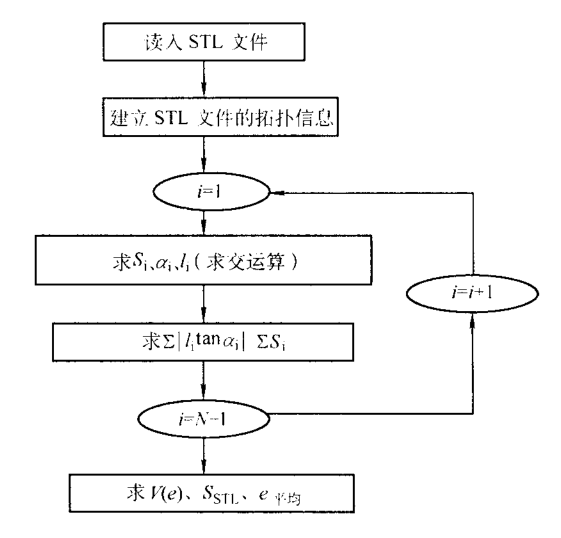


图6.19-10 台阶误差的软件算法流程图

例如，某种叶轮的STL模型是由13250个三角形面片组成的，分层厚度为0.01 mm时，利用上述算法，采用式（6.19-13）算出的叶轮的表面平均台阶误差为0.026 mm。

如果考虑离散误差 ε，则需考虑因离散误差所造成的体积误差。因此，式（6.19-13）可改为：

$$V(e) = |(1/2)\delta^2\sum l_i\tan\alpha_i - (1/2)\delta\psi\sum l_i| \quad i=1,2,\cdots N \quad (6.19\text{-}14)$$

采用式（6.19-14）对该叶轮进行平均台阶误差计算，可求出叶轮的表面平均台阶误差为0.022 mm。可以看出，两种计算的结果相比差8%。这主要是因为：在叶轮的STL文件中法向为正的三角形面片的面积比法向为负的三角形面片的面积大，根据式（6.19-14）可知，由于"加工刀具"的切口误差的引入，使得式（6.19-14）中的 $V(e)$ 值减小，从而导致平均台阶误差减小。可见对于某些STL文件来说，一定条件下，"加工刀具"的切口误差反而会使得原型的平均台阶误差减小。

2.2.3 误差模型的应用

（1）物理原型的台阶误差

物理原型的台阶误差包括最大台阶误差和平均台阶误差。对于一个来自用户的CAD零件模型，在采用快速成形技术成形物理原型时，随着离散误差、加工参数的设置、快速成形系统的精度、以及分层方向等条件的确定，我们可以根据二维模式的通用误差模型得到物理原型的最大台阶误差，根据体积模式的通用误差模型得到物理原型的平均台阶误差，即表面粗糙度。

根据式（6.19-13）和式（6.19-14）可知，一个物理原型的平均台阶误差与分层厚度的平方成正比，因而，当分层厚度减小一倍时，虽然扫描轮廓线将增大约1倍，但是此时平



均台阶误差比原来减小了约1倍。这说明分层厚度的变化和平均台阶误差变化是一种线性的关系。

(2) STL文件的分层方向优化

从体积模式的通用误差模型中可以看出，平均台阶误差$e_{平均}$与α角有关。由于α角是STL面片外法向与分层平面的夹角，这说明STL文件的造型（分层）方向可以进行优化，即平均台阶误差$e_{平均}$有极值问题。如果能够选取合适的分层方向，就可以保证物理原型的平均台阶误差最小。

当然，对于快速成形技术中的造型方向的优化问题不仅包括零件精度的优化，还包括造型时间的优化、原型的关键特征、原型的强度、以及方便后处理工艺等多种情况，因而造型方向的优化问题实际上是一个多目标的优化问题。而一般的实际零件，由于受到RP工艺的限制，可供选择的分层加工的基准面只有少数几个，因而造型方向的优化问题可以简化为：利用前面提到的求平均台阶误差的算法，对这几个不同造型方向的STL文件进行计算，选取$e_{平均}$最小的作为造型方向，以保证原型的精度。

(3) 误差的互补性

不同快速成形工艺的误差与快速成形的工艺实现方式、材料特性以及快速成形系统的精度密切相关。因而从误差的观点看，多功能快速成形系统中不仅具有工艺的互补性（见第10章），还具有误差的互补性。不同的快速成形工艺，它们制造的原型具有不同特征的台阶误差，利用通用误差模型，可确定每种工艺的误差范围，并根据用户对误差要求和限制，确定具体的RP工艺，进行原型的制造。

(4) 从误差模型看快速成形技术的发展方向

1) 从前面的研究分析可以看出，台阶误差是RP技术中最主要的误差来源，而自适应分层是减小台阶误差的有效手段。自适应分层可基于二维误差模型，通过α角来控制自适应分层的厚度，以实现对物理模型误差e的控制。由于引入自适应分层，要求硬件系统和加工工艺有相应的自适应层厚控制，以满足整体工艺的实现。但是如何保证同一种材料不同层厚的适应性，仍然是研究的方向。

2) 从误差模型可以看出，“加工刀具”的直壁形“切口”反而会降低物理原型曲面的表面精度，而形如LOM工艺中的激光切割的楔形切口则对提高物理原型的表面精度有较大贡献。在式(6.19-8)中，当$(\delta\tan\alpha-\psi)$等于零，即$\psi/\delta=\tan\alpha$时，误差e将大大减小。由此可见，当分层厚度δ和STL三角形面片的外法向和分层平面的夹角α确定时，如果引入一个新的加工参数θ，在加工过程中控制“刀具”沿着与分层平面呈θ $(\theta=90-\alpha)$角的关系进行加工，将会大大提高RP技术的精度和表面质量。

2.3 快速成形技术中的误差分析与控制

影响RP系统产生误差的成形参数主要有：自动生成的数控加工代码，机器硬件参数和加工工艺参数等。

2.3.1 数控加工代码自动生成的误差分析与控制

根据数控加工的特点，数控系统的误差一般由三部分组成。

1) 逼近误差 这是用近似计算方法逼近零件轮廓时所产生的误差，也称一次拟合误差。数控加工中需要仿制已有零件的备件而又无法考证零件外形的准确数学表达式，这时只能实测一组离散点的坐标值，用样条曲线或曲面拟合后编程。近似方程所表示的形状与原始零件之间有误差，一般情况下很难确定这个误差的大小。

2) 插补误差 这是用直线或圆弧段逼近零件轮廓所产生的误差。减小这一误差的方法一般是加密插补点，但这会增加程序的数据内存。

3) 圆整化误差 当将工件尺寸换算成机床的脉冲当量时由于圆整化所产生的误差。数控机床的最小位移量是一个脉冲当量，小于一个脉冲当量的数据只能用四舍五入的办法处理。这一误差的最大值是脉冲当量的一半。在点位数控加工中，数控程序的误差只包含一项圆整化误差；而在轮廓加工中，数控程序误差主要由插补误差组成。

而对于STL文件分层后对后续扫描控制带来的问题是：第一，当对每一段折线进行扫描时，平面扫描速度与折线平均长度相矛盾，由于轮廓由许多长度不等的折线构成，而每一段折线扫描速度受线长限制，再加上频繁的启停，效率很低，无法进行高速扫描；第二，折线扫描时，在两折线交点处，由于加减速和启停的原因，使得此区域的扫描加工过程难以控制。对于FDM工艺来说，将造成过堆积或欠堆积；对于激光加工来说，则造成过切或欠切，影响原型精度和外观质量。解决折线扫描问题的方法有以下4种。

1) 对于每一层构成轮廓的折线进行软件圆弧拟合，增加平均长度，减少段数，从而可以提高扫描速度，并且能改善表面质量。这种方法的局限性在于，原型本来不是曲线的部分被强迫改为圆弧，必然带来二次近似误差，精度有所损失。

2) 根据折线构成的轮廓信息，进行特定的计算，产生填充路径，在扫描时只扫填充线，将轮廓线略去不扫，这就避免了轮廓线扫描问题。这种方法特别适用于多堆积头的成形系统。其不足之处在于：一方面，略去轮廓线会使原型表面质量和精度损失较大；另一方面，有些RP工艺不能采用这种方法，如LOM工艺，每一层轮廓线必须扫描，而不能进行填充。

3) 采用检流计式低惯量振镜扫描代替$X-Y$导轨式平面扫描，如SLA-500。这种方法极大地降低了运动机构的惯性，可以使用低惯量的微型伺服电机驱动反光镜片在很小的角度内转动，能实现快速启停。这种方法的局限性在于：第一，对于扫描平面较大的系统，二维系统将产生较大的聚焦误差和枕形误差，为减小误差需采用价格昂贵的补偿和校正装置，而且实现起来较困难；第二，对于无激光RP工艺和强激光RP工艺这种方法难于实现。

4) 基于$X-Y$导轨式平面扫描的特点，研究开发或选用合适的数控系统，将许多首尾相连而且方向变化不大的折线段优化成连续扫描路径，这种方法称作连续路径优化扫描法。路径优化扫描是一种特殊的插补运行方式，在一条路径扫描过程中，只在路径起点和终点分别加减速一次，在中间各点分速度发生变化，合成速度不变，即

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=常数 \qquad (6.19\text{-}15)$$

在每层扫描时，只要数据预处理程序能正确地将折线按一定规则合并成路径，便可以大大提高扫描效率，而且不存在二次近似误差。例如，对于一般原型，构成每层轮廓的几十条甚至上百条折线通常可以合并为几条路径。特别地，对于回转体零件，分层后每一层轮廓为许多折线首尾连成的近似于圆的多边形，这时所有折线通常可合并为一条路径。

为了减小误差，推荐采用连续路径优化的方法。这种优化路径生成的过程如下：数据预处理程序先从分层文件中读取每一层的几何信息，按路径产生规则将各折线编排成一系列路径，每一条路径包含各点坐标、路径扫描速度和堆积强度等信息，然后采用数控系统语言输出能被数控系统识别和执行的NC代码。路径产生的规则为（图6.19-11）：从第一点P_0开始，到P_1点，计算P_0-P_1折线与X正半轴的夹角α_1，然后再计算下一折线P_1-P_2与本折线P_0-P_1夹角θ_1，判断θ_1是否大于门槛夹角θ_k（θ的选取受到扫描轴对于速度瞬时跳变的容忍度限制，一般不能小于门槛夹角θ_k，门槛夹角θ_k是指运动轴所能承受的最大速度跳变所对应的

相邻直线段的夹角，事先根据数控系统测试结果给定），当 $\theta_1 \geqslant \theta_k$ 时，继续计算并判断下一折线 P_2-P_3 与折线 P_1-P_2 的夹角 θ_2，重复以上的计算与判断，直到某一点 P_{i+1} 使上述条件不满足时，说明下一折线方向变化太快，亦即分速度变化大，本条路径 PATH1 定义结束至 P_i，然后从 P_i 开始再计算产生下面的路径 PATH2、PATH3…。

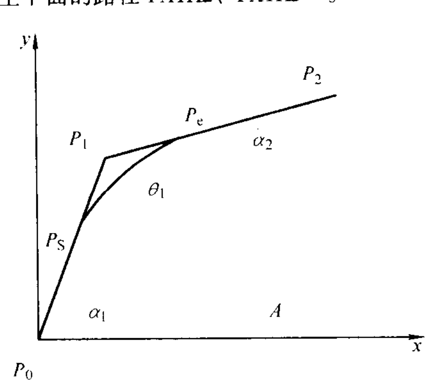


图 6.19-11 路径计算示意图

很显然，θ_k 越小，一条路径所能包含的折线越多，路径扫描法的优越性就越大。在实际 NC 代码生成过程中，根据连续路径优化扫描法，按照运动轨迹的具体形状定义尽可能长的连续扫描路径。对于轮廓扫描，NC 代码产生的基本规则就是：计算轮廓中相邻直线段的夹角，如果其大于门槛夹角 θ_k，则路径继续；否则，路径中断，开始定义一条新路径。

对于网格扫描，由于现有网格均为 X 或 Y 方向的，所以判断规则更简单：如果下一线段与当前线段为同一条直线上的线段，则可在一条路径中定义，只是在路径程序中的适当地方需要加一成形执行机构（如激光）的开或断的控制信号。

总之，采用连续路径优化的方法的最大优点是：提高扫描效率，路径误差减小至尽可能小，且没有二次近似误差。

不管采用那种方法，由于路径扫描必然存在起停、加减速的过程，对于使用激光的 RP 工艺（如 LOM 和 SLS），都需要配合以激光的起停和激光功率与扫描速度的匹配控制，才能实现良好的扫描切割质量。这是采用激光加工的路径扫描控制中的另一个难点，应深入研究激光功率与扫描速度匹配控制的实现。

2.3.2 成形参数选择对于误差的控制

基于前面的研究分析，我们可以得到 CAD 模型域→离散模型域→成形信息域的映射中误差的产生与控制过程，如图 6.19-12 所示。

从图 6.19-12 中可以看出以下几点。

1）CAD 模型生成 STL 数据模型的过程中，开始产生表面离散误差和缺陷误差。表面离散误差由用户设定，一般为 0.01 mm；缺陷误差可以通过 STL 文件的检验和修复软件来消除。因而，流过正确的 STL 数据模型的误差流应只存在表面离散误差。表面离散误差将继续遗传到 CLI 模型中。

2）对正确的 STL 数据模型进行分层处理，得到了 CLI 文件。在这一过程中，由于引入了台阶误差，使得误差进一步放大，此时为了控制台阶误差，需采用自适应分层的办法，而这种控制误差的办法又会受到具体 RP 工艺中有限层厚的限制。

3）利用 CLI 模型可生成数控加工代码。如采用改进路径扫描方式，将引入二次拟合误差，因此本文选用了连续路径扫描方法来求得数控加工代码。由于在成形信息域中，数控系统、加工工艺等存在误差，为了不进一步造成误差的放大，应选用精度适合的数控系统，选定加工参数等，控制“加工刀具”的误差。由于“加工刀具”、加工参数的误差将直接反映在“加工刀具”误差上，这里只引入“加工刀具”误差。

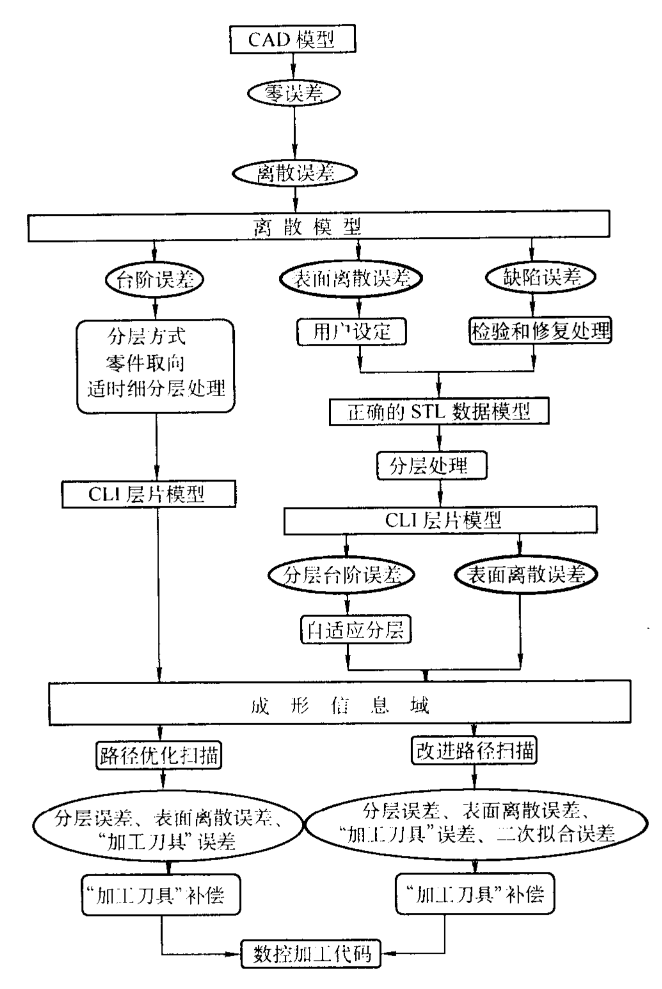


图 6.19-12 CAD 模型域→离散模型域→成形信息域中的误差流分析图

2.3.3 台阶误差的产生及其控制

进一步详细分析台阶误差。台阶误差是指原型表面相对于要求的零件表面产生的误差（图 6.19-13a），它包括“正向”台阶误差和“负向”台阶误差（图 6.19-13b）。正向台阶误差指原型表面处于要求的零件表面外侧时产生的台阶误差。在通常情况下，当要求的零件表面的外法线方向为向下时，产生这种台阶误差。负向台阶误差指原型表面处于要求的零件表面内侧时产生的台阶误差。当要求的零件表面曲面的外法线方向为向上时，产生这种台阶误差。快速成形技术制造的原型误差主要表现为台阶误差，由于快速成形技术是离散-堆积成形，使得要求的零件表面与原型表面产生台阶误差。台阶误差的存在，对原型表面质量影响较大，一般还需经过后处理才能成为最终原型，后处理工艺主要是打磨、上清漆、抛光等。在对原型进行后处理时，如果不考虑台阶误差的产生原因，将有可能导致原型精度的丧失，人为地带来更大的误差。

“台阶误差”可根据集合数学以体积方式表示如下：

$$\Delta = \frac{(V_M \cup V_D) - (V_M \cap V_D)}{S_D} \qquad (6.19\text{-}16)$$

式中，Δ 为原型表面的平均台阶误差；V_M 为原型的体积；V_D 为要求的零件的体积；S_D 为要求的零件的表面积。



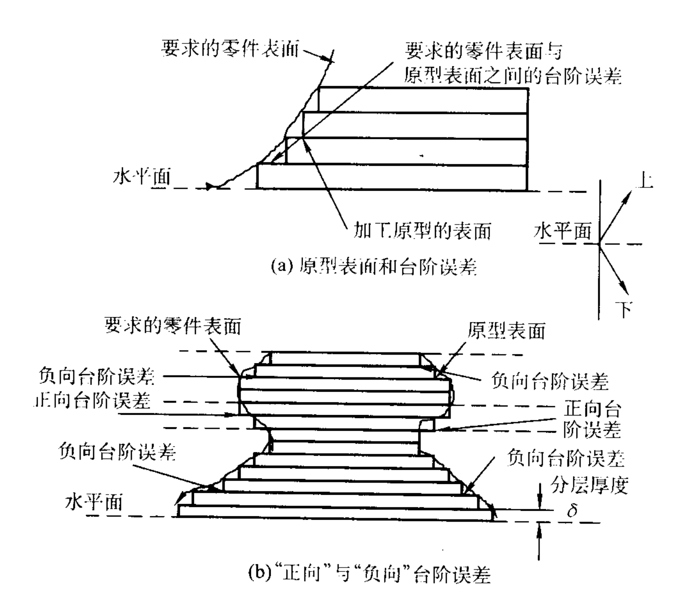


图 6.19-13　各种台阶误差示意图

式（6.19-16）实际上是把原型的台阶误差以求体积的方式给出，是原型的正向台阶误差和负向台阶误差的代数和的平均。

快速成形技术制造的原型精度一般为 0.1 mm，表面的"台阶误差"约为 0.02 ~ 0.08 mm，"台阶误差"是影响原型表面质量的主要因素。对于一定的分层厚度，在原型的凹凸曲面将产生很大的台阶误差。不同的 RP 工艺，台阶误差的大小与分布十分不同。

对于进一步制造功能零件来说，一般需要较光顺的表面，而且较差的表面粗糙度使得原型很难和与之复制的模腔分离，因此必须对原型表面进行光顺处理。对于直接用于做风洞实验的 RP 原型来说，台阶误差会给实验带来较大的误差，表面亦需作后处理。常用的后处理工艺是打磨，它是改善原型表面质量的重要手段。

打磨工艺包括手工打磨和机器打磨。手工打磨是指用砂纸等对原型表面进行处理，原型的质量主要受到人为的因素影响，打磨质量难以控制。机器打磨包括吹送磨料、离心抛光、振动打磨、和超声打磨等技术。

对于快速原型的一般性后处理工艺，包括材料添加（如涂清漆）、打磨以及抛光或精研，其技术的误差瓶颈如图 6.19-14 所示。由此亦可知原型的后处理对于 RP 技术的重要性。目前许多 RP 原型的后处理主要还是依靠手工处理，也没有一个加工标准，这样极易使整个原型丧失原有的精度。误差模型的建立，为原型的表面处理工艺提供了理论依据和加工标准，后处理工艺的选用，要根据正向台阶误差和负向台阶误差的具体量值来确定；这也对适应 RP 技术的表面处理工艺的进一步发展提出了新的要求。

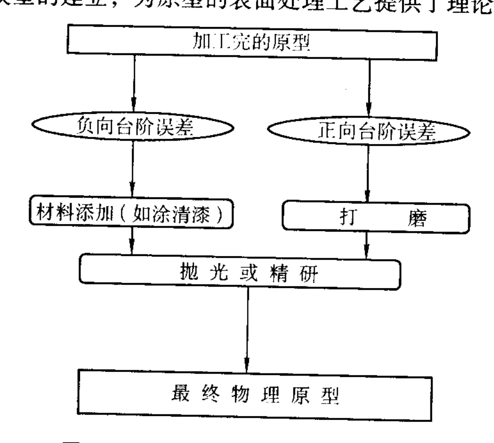


图 6.19-14　加工完的原型的后处理工艺

3　快速成形原型或零件的变形

原型或零件的变形是快速成形技术中经常遇到的问题，它不但影响原型或零件的尺寸精度，还会引起结构整体变形、翘曲或层间开裂，更有甚者使得成形过程无法继续进行。SL、LOM、FDM、SLS 等工艺中均存在着因层间残余应力而导致的原型或零件的变形。因此，研究快速成形中的原型或零件的变形就对提高其最终成形的精度具有重要意义。

3.1　变形的力学分析

零件翘曲变形的根本原因是层与层之间存在应力，应力会导致零件制作过程中的变形或零件制作完成后的蠕变。采用 Marutani 几何模型对悬臂零件进行分析，可以给出相应的翘曲量计算公式。

3.1.1　Marutani 几何模型和翘曲量的计算公式

Marutani 几何模型取悬臂零件的两层采用 Marutani 几何模型进行研究，如图 6.19-15 所示。

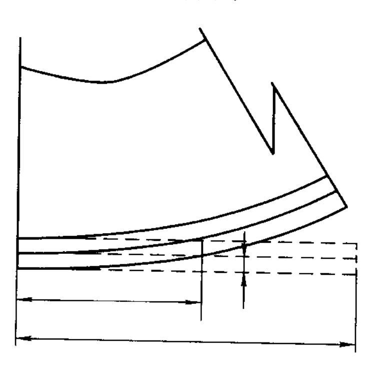


图 6.19-15　零件翘曲模型

设翘曲曲线形状为圆弧，半径为 R，层厚为 h，材料的收缩率为 ε，如果悬臂长为 L，则第二层比第一层缩短 εL，进行几何分析，有：

$$L = R\theta \tag{6.19-17}$$

$$L - \varepsilon L = (R - h)\ \theta \tag{6.19-18}$$

公式变换可得：

$$R = \frac{h}{\varepsilon} \tag{6.19-19}$$

对于下表面距固定端为 d 处的翘曲量 δ 为：

$$\delta = R - R\cos\theta = R(1 - \cos\frac{d}{R})$$

当 $d/R \ll 1$，展开并略去高阶小项，可得 δ 的表达式为：

$$\delta = \frac{1}{2} \times \frac{\varepsilon d^2}{h} \tag{6.19-20}$$

式（6.19-20）表明在悬臂长度远小于翘曲半径时，悬臂结构的变形量正比于悬臂长度的平方，正比于材料的收缩率，反比于层厚。但 Marutani 几何分析的前提是假设翘曲曲线形状为圆弧，第二层比第一层缩短 εL（事实上，因第一层对第二层有约束，缩短量是未知的）。这两个假设容易引起质疑，因此从力学分析的角度对翘曲变形进行分析。

3.1.2　翘曲量的力学分析

力学分析主要是分析由收缩引起的层间应力，它非常类似于复合材料杆的层间温度应力问题。

由 A 与 B 两矩形截面杆胶合为一双层复合材料杆（图 6.19-16），A 杆的弹性系数为 E、G、μ（分别代表弹性模量、切变模量及泊松比），热膨胀系数为 α。B 杆的弹性系



数为 E_1、G_1、μ_1，热膨胀系数为 α_1，且 $\alpha_1 > \alpha$。当温度均匀地自 t_0 增至 t 时，由于两金属条的膨胀系数不同，在两金属条的胶合面内将产生层间温度应力，双层复合材料杆将发生弯曲。通常复合材料杆用作调温器。在接触面内不仅有剪应力 τ_0，并且还有正应力 σ_0，并且应力集中分布在金属条的端部。

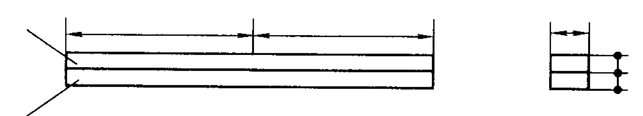


图 6.19-16　复合材料杆模型

以 S 表示剪力，M 表示正应力的等效力矩，它们均较集中地分布在杆的两端（图 6.19-17）。我们仅讨论两种材料一致的情形，即：$E = E_1$，$G = G_1$，$\mu = \mu_1$。

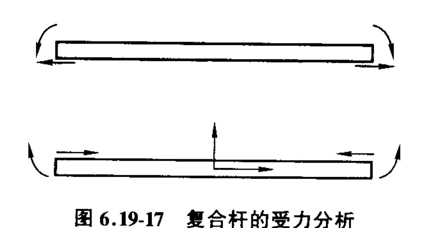


图 6.19-17　复合杆的受力分析

由于 A 与 B 两部分的曲率应相等，故：

$$\frac{1}{\rho} = \frac{Sh/2 - M}{Ebh^3/12} = \frac{S\,h_1/2 + M}{Ebh_1^{\,3}/12} \tag{6.19-21}$$

$$\therefore M = hh_1\,\frac{h_1^{\,2} - h^2}{2\,(h^3 + h_1^{\,3})}S$$

由于两金属条的接触面的上下两点的应变相同，故：

$$\frac{1}{E} \times \frac{S}{bh} + \frac{S\,\frac{h}{2} - M}{\frac{bh^2}{6}} \times \frac{1}{E} + \alpha(t - t_0) =$$

$$-\frac{S}{bh_1} \times \frac{1}{E} - \frac{S\,\frac{h_1}{2} + M}{\frac{bh_1^{\,2}}{6}} \times \frac{1}{E} + \alpha_1(t - t_0) \tag{6.19-22}$$

从式（6.19-21）及式（6.19-22）可以解出剪力 S 和力矩 M，有：

$$S = \frac{bE}{\left(\frac{1}{h} + \frac{1}{h_1}\right) + \frac{3(h + h_1)^2}{h^3 + h_1^{\,3}}}(\alpha_1 - \alpha)(t - t_0)$$

$$M = \frac{(h_1 - h)\,bE}{\frac{2(h^3 + h_1^{\,3})}{(hh_1)^2} + \frac{6(h + h_1)}{hh_1}}(\alpha_1 - \alpha)(t - t_0)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(\alpha_1 - \alpha)(t - t_0)}{\frac{(h + h_1)}{2} + \frac{(h^3 + h_1^{\,3})}{6hh_1}} \tag{6.19-23}$$

A 和 B 杆的热膨胀系数 α 和 α_1 可表示为：

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L(t - t_0)} = \frac{\varepsilon}{t - t_0} \tag{6.19-24}$$

$$\alpha_1 = \frac{\Delta L_1}{L(t - t_0)} = \frac{\varepsilon_1}{t - t_0}$$

式中 ε 和 ε_1 为 A 和 B 杆的线应变。

经整理后可得：

$$(\alpha_1 - \alpha)(t - t_0) = \varepsilon_1 - \varepsilon \tag{6.19-25}$$

RP 中 A、B 不是复合材料杆，而是逐层堆积的层片，则 RP 过程中产生的收缩相当于复合材料温度降低时产生的收缩，此时，收缩导致的应变（收缩率）即相当于温度降低时产生的应变，相当于上式变号。假设杆 B 无收缩，即相当于 $\alpha_1 = 0$，$\varepsilon_1 = 0$，则有：

$$(\alpha_1 - \alpha)(t - t_0) = \varepsilon \tag{6.19-26}$$

若翘曲变形是一圆弧，曲率 $1/\rho$ 是一常数，由这里的公式导出的结果与 Marutani 的几何模型的结果一致。

以堆积两层时为例。因快速成形过程中层厚相等，即：$h = h_1$，则可得挠曲半径 R 为：

$$R = \rho\,\frac{4h}{3\varepsilon} \tag{6.19-27}$$

由图 6.19-17 可得下表面距固定端 d 处的翘曲量 δ 为：

$$\delta = R - R\cos\theta = R\left(1 - \cos\frac{d}{R}\right)$$

将 $\cos\theta$ 级数展开，略去高阶小项，整理后有：

$$\delta = \frac{1}{2} \times \frac{d^2}{R} = \frac{3\varepsilon d^2}{8h} \tag{6.19-28}$$

从上式分析中可以看出，悬臂结构的变形量正比于悬臂长度的平方，正比于材料的收缩率，反比于层厚。从公式可以看出，为减小翘曲量，堆积成形原型或零件时应减小悬臂长度，增大层厚，并且使用低收缩率的材料及采用恰当的 RP 工艺使得 ε 尽可能的小。

3.2　工艺参数对变形的影响及其控制

许多 RP 工艺需要制作支撑，以便被成形件与底板或已成形部分粘结，这样将对材料的收缩施加约束，产生层间应力。随着制作层数的增高，应力集中会越来越严重。当应力大于约束力或层与层之间粘接不好时，零件就发生翘曲变形。

例如，在 LOM 工艺中原型件的变形是在多种因素的影响下产生的，这些因素之间又相互影响、相互作用。原型件的变形的主要影响因素有：

1）LOM 材料通常是涂有热熔胶的纸材，热压时热熔胶融化，实现层与层之间的粘接，冷却时存在着胶由液态向固态相变时的收缩；同时成型纸也存在着热胀冷缩的现象；

2）走纸操作会在涂覆纸中造成机械的拉应力，使涂覆纸产生拉应力，因此纸应在保持松弛的状态下进行热压；

3）应采用预切割的方式来将所需成形的大零件划分为若干个小零件成形，以减小变形；

4）最主要的环境因素是温度和湿度，成形过程中的温度控制要比较严格，实际使用的设备必须放置在恒温干燥的环境中；

5）成形完成后，不应立即剥离废料，而应对成形件施加一定的压力，待其充分冷却后再撤除压力，可以控制成型件冷却时产生的翘曲变形；在成形过程中如有较长时间的间断，应对已成形部分加压。

同 LOM 工艺一样，FDM、SLS、SL 等工艺亦需作类似的分析。

4　快速成形零件的表面质量

4.1　表面特征

在各种生产过程中，任何物体都不可避免地会产生表面，所谓表面是指该物体与周围介质（通常指空气）之间的边界。经过加工的表面一般认为有粗糙的表面和光滑的表面之差别，这可以用视觉或触觉的方法直观地区分：光滑表面大多能反射光线，在表面上看不出有花纹，手感平滑，阻力小；粗糙表面不反光，能看见明显的纹理和沟痕、凹坑，用手指触摸时感到凸凹不平，摩擦力大。但是这种判别带有主观因素，而且只是定性地相对说明零件的表面特征，没有确切地表达表面特征之细节和全貌。对于 RP 技术制造的原型

件或者零件，为了给其表面质量以合理、定量的描述，必须首先讨论其表面特征及其描述法。

原型或零件的许多技术性能的评价常常依赖于零件表面特征的状况，例如：零件表面的耐磨性、密封性、配合性质、摩擦力、传热性、导电性以及对光线和声波的反射性，液体和气体在壁面的流动性、腐蚀性，涂层的附着力，薄膜、集成电路元件以及人造器官的性能，测量仪器和机床的精度、可靠性、振动和噪声等等功能，都与表面的几何结构特征有密切联系。因此，控制零件表面质量的核心问题在于它的使用功能，应该根据各类零件自身的特点规定能满足其使用功能要求的表面特征参量。

4.2　表面几何形状偏差

原型或零件在制造过程中产生的表面几何形状总是不够完善的，加工后的实际表面形状相对于理想表面形状存在一定的偏差。通过测量会发现，在表面上有一系列不同间距和高度的峰谷所组成的不规则几何形状叠加在一起的复杂表面结构。

对于实际表面偏离理想表面的几何形状偏差，现今一般仍采用分为三类结构型式——形状误差、表面波纹度和表面粗糙度来描述。形状误差是指从表面整体形状观察分析表面的宏观状况，其衡量指标有直线度、平面度、圆度、圆柱度、线轮廓度、面轮廓度等。表面粗糙度是指加工表面上所具有的较小间距和微小峰谷这种微观几何形状的尺寸特征，表面波纹度则是介于宏观和微观之间的一种表面形状误差，通常情况下它使表面形成周期性起伏，其波峰和波长比表面粗糙度要大。三种表面形状偏差如图 6.19-18 所示，它们并不是孤立存在的，实际表面通常是三类偏差叠加在一起所形成。

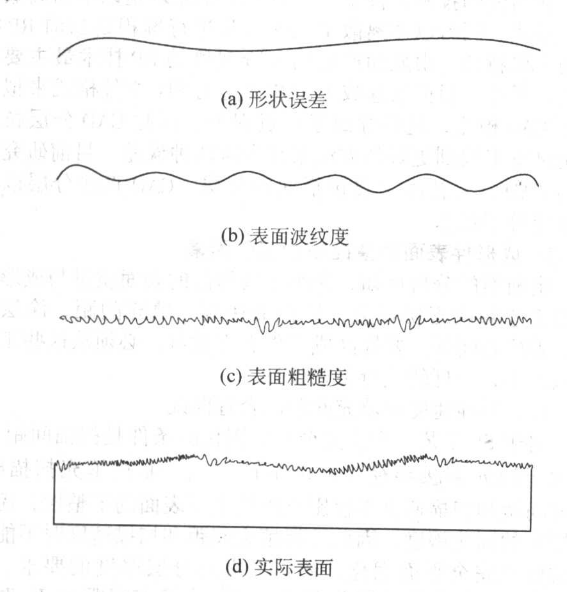


图 6.19-18　三种表面几何形状偏差

表面波纹度的评价指标通常有：a）算术平均偏差 W_a；b）最大峰谷高度 W_t；c）平均波幅 W_z。下面采用取样长度内峰到谷的最大高度 W_t 作为表面波纹度评价指标。

虽然表面几何形状偏差的整体状况对零件表面功能产生综合的影响，但是各类偏差形成的原因和特性，以及它们与各种使用功能的因果关系均不相同，而且受测量手段的约束，因此目前仍采取不同标准分别进行评定，这就提出了如何区分各类偏差的问题。

从表面几何结构的形式来分析，有的学者提出以间距大小来区分：间距小于 1 mm 者属于表面粗糙度；间距在 1～10 mm 范围内按表面波纹度处理；间距超过 10 mm 者为形状误差。显然，这种区分方法并不严密，因为零件大小不同以及工艺方法变化，常打破这种分类方法的界限。另一种意见是用起伏不平的间距和幅度的比值来划分：其比值小于 50 者算作表面粗糙度；当比值范围为 50～1 000 时属于表面波纹度范畴；在比值大于 1 000 时按形状误差处理。这是在分析通常使用的各种加工方法所产生的各类几何形状偏差后的综合计算结果。合理的区分方法应该根据三类几何形状偏差各自的形成原因和特点进行具体的分析，上述的数值范围只能作为一般概念，供分析时参考使用。

研究一种成形工艺的表面质量，必须对其影响因素进行分析。影响光固化成形零件表面质量的因素包括模型数据误差、台阶效应、扫描参数、填充间距和填充方式、涂层速度、涂层方式、成形温度、成形湿度、后处理时间特性等等，根据其产生的不同阶段可以分为数据处理因素、成形工艺因素以及其他因素三类，下面对各类因素分别进行分析。

4.2.1　成形工艺因素

影响成形件表面质量的成形工艺因素是我们研究的重点，因为它们对成形件的表面质量影响很大而且其可控性很好。当采用较优的工艺参数制作的成形件的表面质量比采用较差的工艺参数的情况要高得多。下面以光固化工艺为例分析影响成形件表面质量的工艺参数包括填充间距、造型方向、涂层速度、涂层间隙、等待时间、扫描速度等，下面一一进行分析。

图 6.19-19 是光固化成形零件上表面粗糙度随填充间距的变化曲线，从曲线中可以看出在填充间距小于某一临界值时，表面粗糙度变化不大；而填充间距超过临界值时，表面粗糙度急剧增大。这是因为填充线已成为分离的单一固化线，图 6.19-20 的 SEM 照片也证实了这一点。

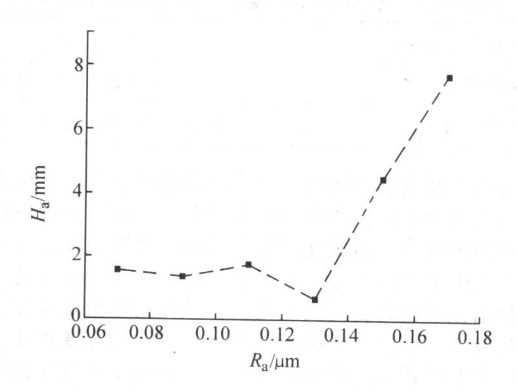


图 6.19-19　表面粗糙度与填充间距的关系

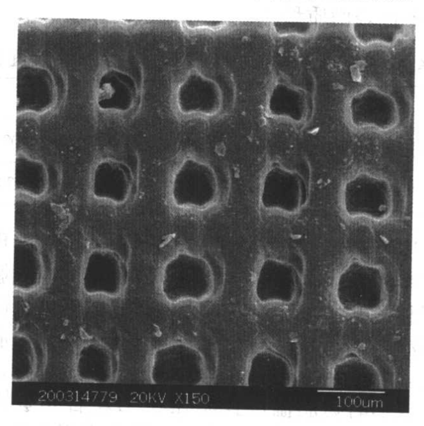


图 6.19-20　填充间距过大的试件表面

造型方向对零件表面质量的影响主要是由于成形时零件上不同位置的表面其表面粗糙度不一样，其根本原因还是台阶效应。根据零件表面的不同位置特征可将其分为上表面、上倾斜表面、垂直面、下倾斜表面和下表面五类，表 6.19-1 列出了某零件各类表面的粗糙度值，从表中可以看出上表面的粗糙度最小，垂直面和下表面次之，上下倾斜面最差。从前面对的台阶效应的分析也可以看出这一点。从提高表面质量的角度来说，选择造型方向时应尽可能把重要的面摆放在上表面的位置。

表 6.19-1　零件不同位置表面的表面粗糙度

测量表面	表面粗糙度 $R_a/\mu m$
上表面	0.54
上倾斜表面	22.8
垂直面	5.5
下倾斜表面	26.7
下表面	4.4

SL 的涂层工艺参数直接影响光固化时液面的平整性，因此它们对零件上表面的表面质量存在较大影响，尤其是对表面波纹度的影响。涂层工艺参数主要包括涂层速度、涂层间隙和等待时间，涂层间隙主要影响涂层后树脂的厚度，对液面的平整性影响不大。涂层速度的大小影响涂层后液面的起伏大小。表 6.19-2 列出了不同涂层速度下制件表面质量的数值，从表中可以看出涂层速度的大小对表面粗糙度影响并不大，但表面波纹度随涂层速度增大而显著减小。这是由于光敏树脂是一种剪切变稀的流体，涂层速度变大时，树脂的剪应变速率变大，其黏度反而变小，树脂易于流平。

表 6.19-2　不同涂层速度制作的试样的表面质量

涂层速度 $v/mm \cdot s^{-1}$	10	20	30	40	50
表面粗糙度 $R_a/\mu m$	0.997	1.297	1.342	1.522	1.288
表面波度 $W_t/\mu m$	245.81	215.24	154.5	96.3	71.45

等待时间也影响涂层后的树脂液面的平整性，从直观上看，等待时间越长，树脂液面就越平整，但实际成形时必须考虑到成形效率，否则光固化工艺的快速性就失去意义。表 6.19-3 列出了不同等待时间下制作的试样的表面质量。从表中可以看出随着等待时间的延长，试样的表面粗糙度和表面波纹度都有所下降，但幅度并不大。与涂层速度相比，等待时间对零件表面质量的改善作用非常有限，而且延长等待时间会大大降低成形效率，所以通常都采用提高涂层速度的方式来提高零件表面质量。

表 6.19-3　不同等待时间制作的试样的表面质量

等待时间 t_w/s	2	4	6	8	10
表面粗糙度 $R_a/\mu m$	1.885	1.431	1.41	1.409	1.088
表面波度 $W_t/\mu m$	166.38	107.56	124.56	132.34	119.57

除上述因素外，成形温度、成形湿度、后处理时间等其他因素对零件表面质量均有影响。成形室的温度影响光敏树脂的粘度和密度，温度升高时光敏树脂的粘度下降，有利于树脂涂层流平，同时合适的温度也有利于光敏树脂对激光能量的吸收。但是，过高的温度会使树脂挥发加剧，大量工艺实验表明成形时树脂温度控制在 35℃左右光敏树脂成形性能最好。成形室湿度也影响光敏树脂的光固化性能。早期的丙烯酸基光敏树脂对湿度就非常敏感，Auro350 采用的光敏树脂 Somos 11120 是一种环氧基光敏树脂，它的抗湿性能要好很多。但是，我们在工艺实验中发现，该树脂长期置于潮湿环境下也会吸收空气中的水分，导致其成形性能大幅度下降，具体表现为成形时零件的毛坯强度（green strength）很低。因此，光固化成形时成形湿度通常应控制在 30%RH 以下，能保持在 10%RH 为最佳。由于光固化成形完的零件中存在部分树脂未完全固化，所以在清洗完表面残余树脂后应将零件放入后处理设备中进行完全固化以提高零件强度及尺寸稳定性。后处理设备采用紫外灯照射零件使其完全固化，照射时间的长短影响零件的收缩变形。过长的后处理照射时间会使零件的翘曲变形加剧，增大零件的形状误差。通常零件的后处理时间为 15～30 min。

扫描速度和激光功率共同决定了扫描时树脂液面的最大曝光强度，对于 TEM_{00} 的高斯光束最大曝光强度可由下式计算：

$$E_{max} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{P_L}{\bar{\omega}_0 V_s} \tag{6.19-29}$$

式中，E 为扫描速度；P_L 为激光功率；$\bar{\omega}_0$ 为激光束腰半径；V_s 为扫描速度。

4.3　成形件表面质量控制

成形件的表面质量控制研究的目的是：在分析成形表面误差来源的基础上，针对各种误差的形式，来寻找不同的解决办法，从而使成形零件的表面质量尽可能高。根据上节分析的误差来源主要有三个方面：数据处理、成形工艺控制和其他参数。质量控制也就是从这三个方面入手，来减小光固化成形件表面误差。

4.3.1　提高数据处理精度

在当前的技术条件下，离散－堆积原理是以平面离散为主要形式，同时以体离散生成的层片进行堆积是当前 RP 技术的主要特征。由此而产生的台阶现象是 RP 技术最主要的缺陷。另外，目前快速成形工艺都是用 STL 文件格式来拟合三维 CAD 模型，这样导致了逼近误差，因此 CAD 分层技术就是试图来找到更好的方法来减少这两种误差。目前研究较多的 CAD 分层技术主要包括曲面分层、CAD 直接分层以及自适应分层技术。

4.3.2　成形件表面质量控制的工艺因素

由前面的分析可知，光固化成形件的表面质量与成形过程的工艺参数密切相关，如扫描速度、填充间距、涂层速度、等待时间等。要提高成形件表面质量，必须从这些工艺参数入手，合理的进行工艺设计。

（1）扫描速度和填充间距的合理匹配

对于 SL 工艺，产生完全平面固化的条件是扫描间距 H_s 不大于激光束腰半径（光斑半径）$\bar{\omega}_0$，而在填充扫描时，填充间距和扫描速度不仅影响固化上下表面的平整性，还包括层片的固化深度，因此选择填充间距和扫描速度时不能只考虑保证完全平面固化，还应考虑到分层厚度的要求。设 CD_0 为单条扫描线的固化深度，CD_v 为填充间距为 H_s 时的平面固化深度，则有：

$$CD_0 = D_p \ln(E_{max}/E_c) \tag{6.19-30}$$

$$CD_v = CD_0 + D_p \ln(E_v/E_{max}) \tag{6.19-31}$$

式中，E_v 为填充扫描时平均曝光强度，它与最大曝光强度 E_{max} 的比值取决与填充间距 H_s 和光斑半径 $\bar{\omega}_0$ 的比值，他们的关系可由图 6.19-21 所示的曲线表示。

（2）成形工艺参数的选用

以立体光刻（SL）工艺为例。对于成形过程，最重要的是选择影响成形质量和成形稳定性的主要工艺参数；要提高制件的表面质量，也必须考虑如何优化工艺参数，如扫描速



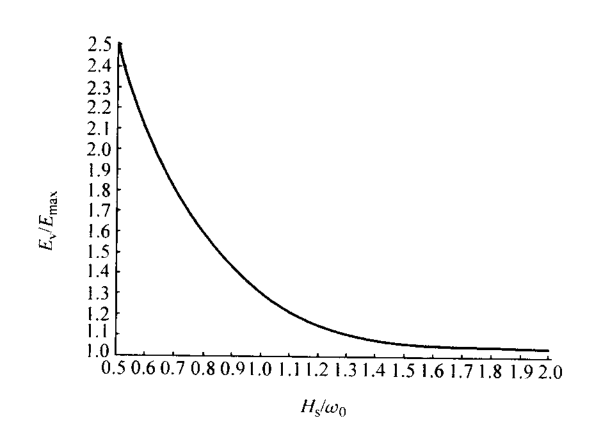
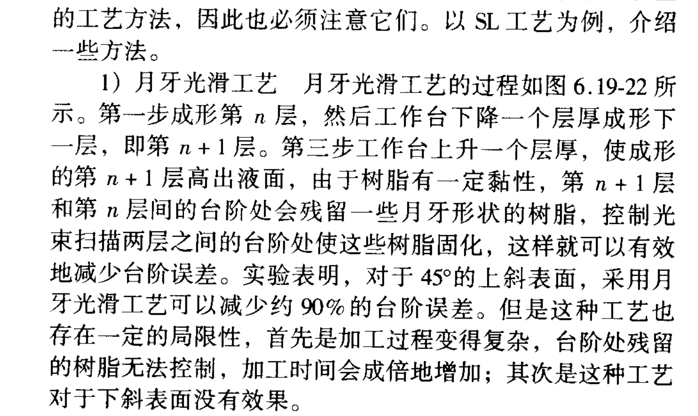


图 6.19-21　E_v/E_{max} 与 $H_s/\bar{\omega}_0$ 的关系曲线

度、扫描线间隙以及等待时间等。详细情况见各种 RP 工艺的章节。



(3) 改善表面质量的工艺方法

对于各种快速成形工艺，还存在其他一些提高表面质量的工艺方法，因此也必须注意它们。以 SL 工艺为例，介绍一些方法。

1) 月牙光滑工艺　月牙光滑工艺的过程如图 6.19-22 所示。第一步成形第 n 层，然后工作台下降一个层厚成形下一层，即第 $n+1$ 层。第三步工作台上升一个层厚，使成形的第 $n+1$ 层高出液面，由于树脂有一定黏性，第 $n+1$ 层和第 n 层间的台阶处会残留一些月牙形状的树脂，控制光束扫描两层之间的台阶处使这些树脂固化，这样就可以有效地减少台阶误差。实验表明，对于 45°的上斜表面，采用月牙光滑工艺可以减少约 90% 的台阶误差。但是这种工艺也存在一定的局限性，首先是加工过程变得复杂，台阶处残留的树脂无法控制，加工时间会成倍地增加；其次是这种工艺对于下斜表面没有效果。

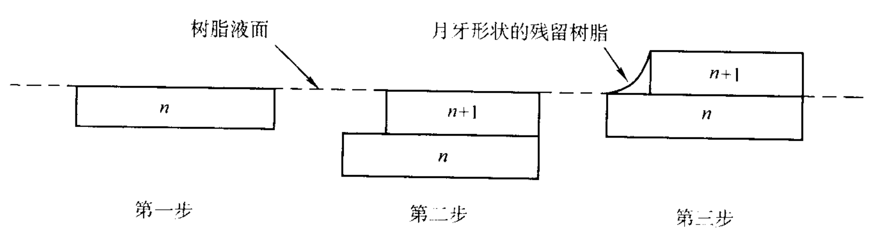


图 6.19-22　月牙光滑工艺过程

2) 填充顺序的改进　光固化成形过程中进行填充扫描时，扫描平面上的树脂发生固化收缩，填充的顺序会影响层片的收缩情况。以 XY 填充方式为例，如果每个层片的填充顺序都是先沿 X 方向填充然后沿 Y 方向填充，则层片中的收缩应力一直是一个方向的，累积到一定程度最终导致零件发生大的翘曲变形。有鉴于此，在填充扫描时采用交替顺序进行扫描。由 X 方向的左右、Y 方向的前后以及 X、Y 方向的先后可组合成 8 种扫描顺序，在填充时每 8 层穷尽这 8 种顺序，则不同扫描顺序成形层片的收缩应力可以相互抵消，从而减少最终成形零件的收缩变形，提高成形质量。

5　MEM 系统的误差分析与造型质量控制

熔融挤压成形（MEM）工艺是一个包含 CAD/CAM、数据处理、数控、材料、工艺规划及后处理的集成制造过程，每一环节都可能引起这样或那样的误差，这些误差会严重损害 MEM 成形件的精度，因此研究 MEM 成形系统误差的来源和原因，以及在此过程中如何减小误差或避免误差就有很重要的意义。

5.1　MEM 系统造型的误差分析

从 CAD 模型到快速制造零件需要经历一系列的环节和过程，各环节间密切相联，每一阶段都会对最终成形零件精度产生影响。沿着 MEM 成形过程依次分析即可找出产生成形误差的各种原因及其主次关系。这些影响 MEM 原型精度的主要因素按照其产生来源可归纳为如下几个主要方面：①成形原理；②数据处理；③材料；④设备及控制系统；⑤成形工艺。见图 6.19-23 所示。

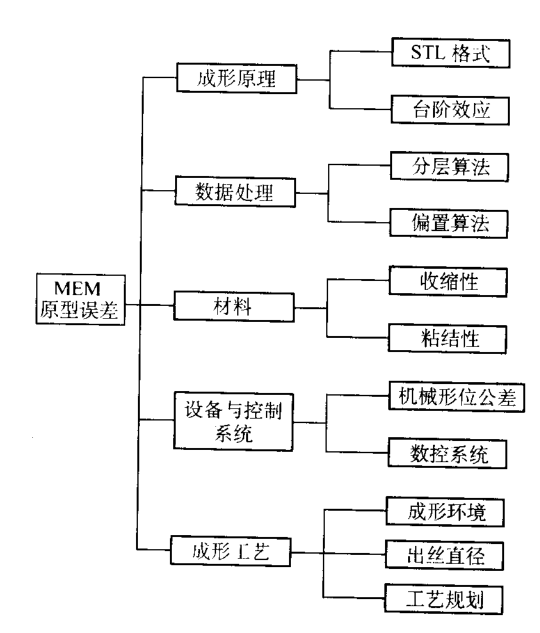


图 6.19-23　MEM 原型误差来源分解图

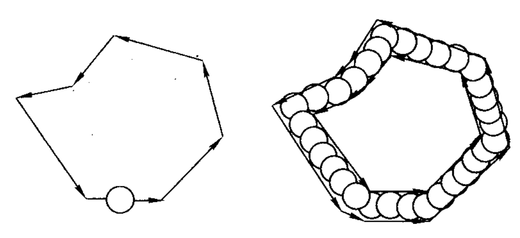
影响 MEM 原型精度的因素有很多，但可依据其影响机理和程度分为原理性因素和工艺性因素两类。顾名思义，原理性因素是因成形工艺原理本身所带来的影响因素，所产生的误差是一种原理性误差，是无法克服和降低、或者消除成本极高的误差。如果要降低原理性误差，往往需要在成形原理上进行根本性改进或变革。工艺性因素是因成形工艺过程所带来的影响因素，所产生的误差称之为工艺性误差，是可以改善而且改进成本较低的误差。通过对成形工艺进行深入分析，理解其机理，然后进行合理的工艺规划，对成形参数进行协调优化选择，对整个系统进行优化控制，可极大地降低工艺性误差，取得令人满意的效果。

5.2　MEM 工艺过程中数据处理产生的误差

MEM 工艺过程中数据处理产生的误差主要来源于 STL 分层算法和轮廓的偏置算法，前者与所有 RP 工艺相同，前文已有讨论；后者的讨论如下。

MEM 工艺中，基于区域裁剪原理的鲁棒偏置算法为：偏置轮廓通过刀具沿原始轮廓连续运动所形成的包络线得

到，通过一个连续的介质（刀具）的连续运动形成的连续区域，可以将原始环和偏置环联系在一起。如图 6.19-24 所示。



(a) 原始轮廓和刀具　　(b) 刀具运动和包络线

图 6.19-24　通过刀具运动包络线得到偏置轮廓

快速成形工艺的轮廓数据由 STL 分层得来，因此，它们都是以一些连续的直线来近似原始的轮廓，产生的轮廓环就是一个平面多边形。平面多边形的偏置虽然不存在曲线类型变化的问题，但经常会产生奇异情况，仍然相当困难。几种常见的奇异情况如：

1）原始曲线段的消失，如图 6.19-25a 所示；

2）裁减偏置线段以保持偏置曲线的一阶几何连续，如图 6.19-25b 所示；

3）为偏置曲线添加线段以保持偏置曲线的一阶几何连续，如图 6.19-25c 所示；

4）在偏置半径大于曲线曲率半径处，产生尖头（cusp）和环，如图 6.19-25d 所示；

5）偏置曲线产生自交，如图 6.19-25e 所示；

6）内偏置曲线位于原始轮廓之外，如图 6.19-25f 所示；

7）两个偏置轮廓相交，如图 6.19-25g 所示。

从以上分析中可以看出，通过 MEM 工艺的偏置算法，原来 STL 分层来的轮廓环就会产生各种奇异，这样就会导致轮廓精细结构产生变化，严重时可能会丢失原始轮廓信息。这样在最后完成的原型中就必然会带来尺寸误差和形状误差。

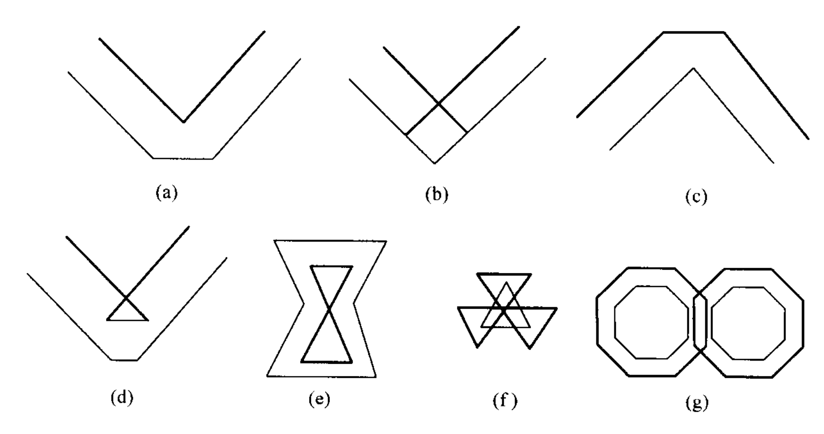


图 6.19-25　平面多边形偏置中的各种奇异情况

5.3　成形过程中材料收缩和黏结产生的误差

熔融挤压成形系统所用材料主要是蜡及 ABS 等工程塑料。成形过程中材料发生两次相变过程：一次是由固态丝状受热熔化成熔融态，另一次是由熔融态经喷嘴挤出后冷却成固态。这两个过程中的材料性能变化直接影响成形过程及原型精度。材料凝固过程中的体积收缩率对最终成形零件精度有重要影响，不仅会影响尺寸精度，而且会导致内应力，以至出现层间剥离等现象。另外，在 MEM 工艺中材料存在两次主要的黏结：一次是层与层之间的粘结，另一次是层内的粘结。它们都会导致形状误差。

5.3.1　成形过程中材料收缩产生的误差

对于 MEM 工艺，材料的热胀冷缩是必须考虑的因素。对于现在比较常用的材料 ABS，其熔融温度为 220～240℃，线胀系数 δ 为（6.2～9.5）$\times10^{-5}$℃$^{-1}$。假设一块长度 l 为 50 mm 的 ABS 样品，从熔融温度冷却到室温（约 30℃）的温度差为 ΔT，取线胀系数约为 7.5×10^{-5}℃$^{-1}$，则样品的理论收缩长度：

$$\Delta l_t = l\Delta T\delta = 0.75\ \text{mm} \qquad (6.19\text{-}32)$$

由于 MEM 工艺的过程是 ABS 丝材的熔融物在成形平台上的层层堆积，一般零件的内部采用网格形式填充，而且网格的堆积是有时间性的，层的堆积也是有时间性的。也就是说样品实际的收缩长度：

$$\Delta l_r = \varepsilon\Delta l_t \qquad (6.19\text{-}33)$$

式中，$\varepsilon\propto f$（$L_{形}$，Δt，$\tau_{网格}$，$\tau_{层}$，…），$L_{形}$ 是零件的截面的形状，Δt 是造型过程的温度变化，$\tau_{网格}$ 是网格堆积的时间性，$\tau_{层}$ 是层堆积的时间性。

由于 ε 与很多因素有关，而且每种因素均有不确定性，很难找到一种精确的数学模型来衡量它，所以在实际的操作过程中一般用实验来测量不同形状与尺寸零件的收缩量，来估算 ε。下面是典型零件的实验数据（如图 6.19-26）。

1）分层厚度 0.2 mm；

2）喷嘴直径 0.4 mm；

3）喷头型腔温度 270℃；

4）成形室温度 70℃。

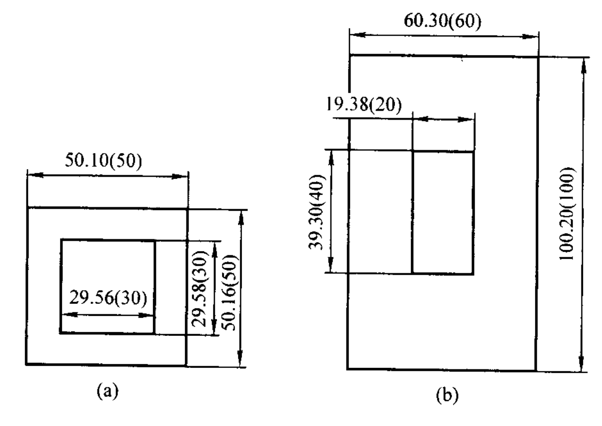


图 6.19-26　典型零件的实验数据
（备注：括号里的数据是 CAD 尺寸）

从实验数据（如表 6.19-4）中，可以发现当零件最大尺寸小于 100 mm 时，零件的最大收缩小于 0.3 mm，相对于理论计算的 0.75 mm，也就是说 ε 小于 0.4。因此在数据处理



的时候要把这部分收缩量要考虑进去，这样才能做出比较正确尺寸的原型。

MEM 工艺材料在成形过程中的收缩具有不确定性，即使可以通过软件算法来弥补这部分导致的误差，但仍然无法消除，只能控制在一个范围之内，从上面的实验结果可知，控制的范围约 ± 0.15 mm。

表 6.19-4　典型零件内外轮廓收缩量

零件	内轮廓 1 收缩量/mm	内轮廓 2 收缩量/mm	外轮廓 1 收缩量/mm	外轮廓 2 收缩量/mm
零件 *a*	30 - 0.4 - 29.56 = 0.04	30 - 0.4 - 29.58 = 0.02	50 + 0.4 - 50.10 = 0.30	50 + 0.4 - 50.16 = 0.24
零件 *b*	20 - 0.4 - 19.38 = 0.22	40 - 0.4 - 30.30 = 0.30	60 + 0.4 - 60.30 = 0.10	100 + 0.4 - 100.2 = 0.20

5.3.2　成形过程中材料粘结产生的误差

MEM 工艺过程中材料粘结分成两种：①层与层之间的材料黏结；②层内材料黏结。层与层之间的材料黏结其实就是快速成形原理性误差“台阶误差”的具体表现形式之一，在前面已经详细讨论过这个问题。因此，下面主要研究一些层内材料黏结产生的误差。

图 6.19-27 为 MEM 工艺的网格扫描示意图，一般来说，规划路径有两种方式：①先扫描网格，然后扫描轮廓；②先扫描轮廓，然后扫描网格。对于第一种方式来说，在扫描完网格时，先扫描的网格已经冷却下来，由于数控系统扫描直线时都有加速度，所以在网格的拐角处材料就会略有过堆，当扫描轮廓时，轮廓路径就会与网格拐角处的路径产生局部干涉，因为网格材料已经固结，轮廓路径只有被动地被“挤”出去，从而使直线产生波纹（如图 6.19-28）。MEM 工艺制造的原型在光照下能看到的波纹就是如此产生的。这种波纹将会导致尺寸误差和表面误差。对于第二种方式，在扫描完轮廓后，前面扫描的轮廓已经冷却而产生固结，当扫描网格时，网格拐角处仍然会产生材料略过堆，但由于轮廓材料已经变硬，所以网格材料就会被迫往内“挤”，所以应该说这种情况原型产生的误差比第一种方式要小一些，但由于轮廓线扫描时基础不好，而且只是一条路径，因此在网格扫描时，可能会破坏轮廓路径。

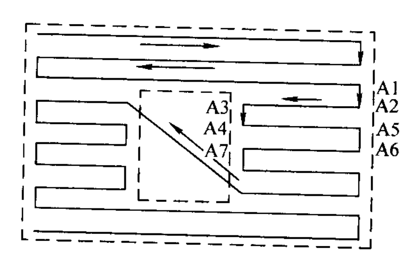


图 6.19-27　分区连续扫描的进一步分析

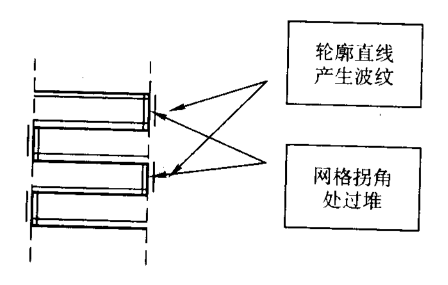


图 6.19-28　轮廓被“挤”产生波纹示意图

5.4　设备与控制系统产生的误差

设备与控制系统引起的误差主要可以分为两类：位置控制精度误差和形状误差。

影响位置控制精度的主要因素是驱动方式和定位方式。从目前已有的快速成形系统来看，头堆积成形时的扫描驱动方式有三种。

1）用伺服电机经精密滚珠丝杠驱动，并用直线精密导轨导向。这种方式能保证成形头的位置重复精度在 ± 10 μm 以内。

2）用齿型皮带（同步齿轮带）驱动。这种驱动方式的位置重复精度不够高，但运动速度较快。

3）用转镜控制扫描。当成形头为激光时，可用改变转镜（振镜）的反射角来控制成形头的扫描。这种方式的扫描速度快，较适合于工作台较小的成形系统。这是因为当工作台较大时，若不采取补偿措施，激光束对扫描点的入射角不为直角，从而使成形精度下降。

以 MEM250 型成形机为例，该快速成形系统采用第一种方式，其加工过程是一个两轴半的联动过程，*X*、*Y* 方向两个坐标联动控制成形头的运动以完成每个层面的成形加工，而 *Z* 方向则控制升降工作台。数控系统及导轨的位移控制精度，包括定位精度、重复精度等，将直接影响成形零件尺寸精度。

Z 方向位移误差将直接影响原型的 *Z* 向尺寸和形状精度。工作台在垂直面内的运动直线度误差宏观上产生制件的形状、位置误差，微观上导致粗糙度增大（层层堆积产生的错位）。

X、*Y* 方向应能联动实现准确的插补运动，插补精度将直接影响每一层的轮廓加工精度。而目前数控系统包括导轨、电机的控制精度一般均可达到 μm 及 10 μm 数量级，所以正常情况下它对成形加工精度影响很小。

影响形状误差的主要因素有：*X* 轴和 *Y* 轴的垂直度、*XY* 扫描平面与 *Z* 向的垂直度和 *XY* 扫描平面与工作平台的平行度。这主要通过机器设计和装配调试过程来保证精度。

5.5　成形工艺产生的误差

MEM 系统的成形工艺误差是指与其工艺特点相关并可以不断改进的误差，主要包括成形环境造成的原型误差、材料路径宽度造成的层面轮廓的几何误差以及工艺规划引起的成形误差。

成形环境造成的原型误差主要可分为成形底板选择方式和成形室温度控制。考察目前熔融挤压成形设备，会发现主要有三种形式的成形底板。第一种成形底板是由疏松泡沫板、四块夹持板组成。泡沫板事先在铣床铣平，四周打 8 个圆孔与夹持板配合，夹持板夹好后就成为造型平台（如图 6.19-29）。第二种成形底板方式是在标准平台上铺一层薄膜，为了防止薄膜在造型时产生卷曲或移动，标准平台下由气泵抽气，产生负压，在大气压的作用下，薄膜紧贴标准平台，就成为造型平台了（如图 6.19-30）。第三种成形底板方式是 ABS 硬平板由双面胶粘结在标准平台上形成的造型平台（如图 6.19-31）。

MEM 工艺中扫描的路径宽度主要由喷嘴直径的大小决定，但如果扫描速度差别很大，则扫描路径也会有相应的变化。喷嘴直径的大小不但决定了 MEM 工艺制造精细结构的能力，而且对 MEM 工艺的偏置算法有很大的影响。喷嘴的直径越大，那么偏置算法产生奇异的概率就越大，从而使原型形状和尺寸产生大的误差。

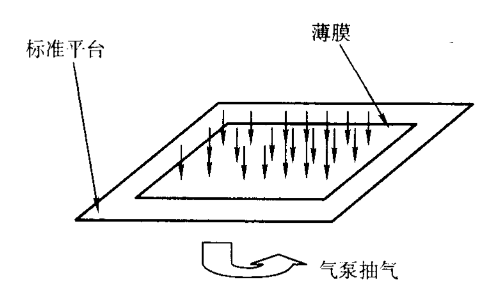


图 6.19-29 底板方式一

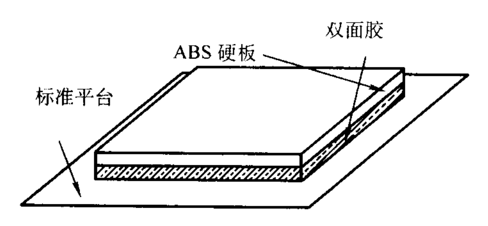


图 6.19-30 底板方式二

双面胶
ABS 硬板
标准平台

图 6.19-31 底板方式三

6 快速成形机床的标准化研究

当前，我国的快速成形设备面临严酷的市场竞争，特别是国外设备在性能、质量、可靠性及成形材料适用性等方面较国产设备强。只有大幅度提升国产设备的设计与制造水平，才能真正占据国内市场，甚至参与国际市场的竞争。但是目前快速成形技术和设备的开发和制造完全由各厂商自行决定，没有专业标准和规范可以参照。制定快速成形设备的国家标准，不仅可以规范国内生产厂家的生产和设备的标准，促进中国快速成形技术更快和更健康的发展，保护用户和企业的利益；而且还可以使企业占领世界快速成形行业的制高点，为中国快速成形设备走向世界创造条件。

从快速成形设备的属性上看，应当归于特种加工机床范畴。为此，全国特种加工机床标准化技术委员会于 2002 年底成立了快速成形机床标准化工作领导小组，并于 2004 年完成了《特种加工机床　术语　第 7 部分：快速成形机床》国家标准（GB/T 14896.7—2004）。2004 年初，又成立了制定《立体光固化激光快速成形机床　技术条件》、《熔融挤压快速成形机床　技术条件》、《分层实体制造快速成形机床　技术条件》和《激光选区烧结快速成形机床　技术条件》四项行业标准的起草工作小组。2004 年，经国家标准化委员会审批，《快速成形机床制造标准化研究》列入了“机床、大型过程施工机械和现代化农业装备新技术标准研究与制定”项目。

下面以熔融挤压快速成形机床为例，介绍快速成形机床标准化制订的研究工作。

清华大学激光快速成形中心和清华大学企业集团北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司在国家高技术研究开发计划（863 计划）的资助下，将熔融挤压快速成形设备产业化，并向市场推出了 MEM-250-Ⅱ、MEM-330-Ⅱ、MEM-350、MEM-600 等机床，它们之间的主要区别是成形空间不同，适合于家用电器及汽车内饰件等的快速原型制造。

与标准化相关的研究主要包括三个方面。

1）现状调研

① 开展广泛的调研准备工作，收集国内外的研究论文、测试报告以及多家企业的产品样本等相关资料，为编写标准提供依据。

② 采用深入生产实际的方法，全面地认识熔融挤压快速成形工艺的技术内涵，为标准制定取得经验。

③ 开展国内外熔融挤压快速成形机床产品的检测和实验工作，进行几何精度、工作精度等测试及安全性考察。

2）技术内涵研究

① 通过研究人员研讨、专家咨询和向业内征求意见，规定出熔融挤压快速成形机床的加工和装配质量、安全防护、试验方法、检验规则、标志与使用说明书、包装、运输与储存等技术要求。

② 制订出熔融挤压制造技术条件与工艺标准。制订过程中吸收其他特种加工机床国家标准的经验，完成技术条件标准化的研究。

③ 深入了解我国各类高分子材料国家标准的制订情况，为熔融挤压快速成形材料检验标准的制订创造必要的条件。

3）有关标准的研讨及标准制订

① 在国家标准化管理委员会的协调下，参考其他类型特种加工机床的国家标准，制定出熔融挤压系列快速成形机床标准的初稿，并且对该系列机床进行初步考核。

② 熔融挤压快速成形机床标准的初稿完成后，在国家标准化管理委员会的帮助下，对熔融挤压快速成形系列机床进行各项考核工作，通过 2～3 个反复，完善该标准。

③ 为其他各类快速成形机床的国家标准制定积累经验。

有关熔融挤压系列快速成形机床标准化方面的具体研究成果在本章前述各节中已有阐述。标准的制订是在北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司 2002 年发布实施的 Q/SHT001—2002 企业标准《MEM 系列快速成形系统技术标准》，以及在 2003 年发布实施的公司内部适用的《熔融挤压快速成形系统安全防护技术要求》的基础上完成的。由于熔融挤压（熔融沉积）快速成形机床没有统一的测量标准（国际上生产熔融沉积快速成形机床的美国 Stratasys 公司也没有这方面的公开测量标准），工作小组综合考虑反映熔融挤压（熔融沉积）快速成形加工方式的特点，设计出不同的测试件，最终制定出标准测试件。然后，在国内外各种熔融挤压（熔融沉积）快速成形机床上，采用各公司独自生产的专用丝材，加工制造出标准测试件，并且进行加工精度等方面的测量。

熔融挤压系列快速成形机床为机电一体化产品，技术要求涉及的标准较广，为减小标准篇幅，大量引用了机电类、数控类产品的通用条件等 10 余项标准。目前《熔融挤压快速成形机床　技术条件》被选定为制修订机械工业推荐性行业标准项目。

熔融挤压系列快速成形机床的标准主要规定熔融挤压成形机床的制造与验收的一般要求、安全防护要求、加工与装配质量（对于特殊的成形材料才能够装配）、机床的空运转试验、机床的运行试验、机床的精度检验、标志与使用说明书、包装、运输与贮存。因为本产品尚无安全标准，故引用了多个相关国家标准。标准中写入了环境保护方面的内容的目的是增加制造商对环境保护的意识。另外，由于机床尚无精度检验方面的国家标准或行业标准，故熔融挤压系列快速成形机床的标准中不仅提出了试验要求，而且还提出了精度检验方法等方面的内容。图 6.19-32 是试件精度测量位置示意图，表 6.19-5 是试件精度测试表。



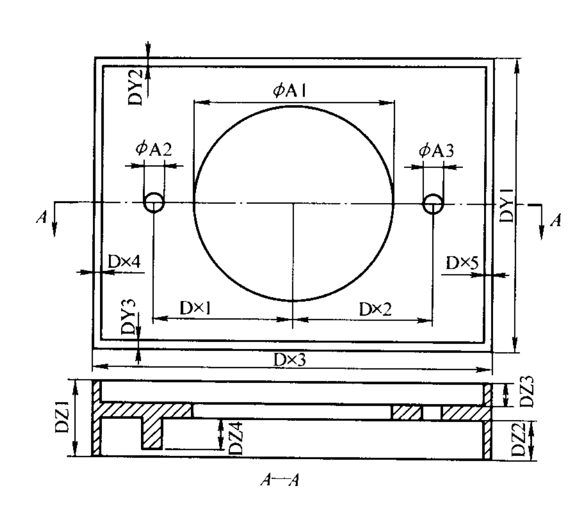


图 6.19-32　试件精度测量位置示意图

表 6.19-5　精度测试表

测量标记	理论值/mm	测量值/mm	测量标记	理论值/mm	测量值/mm
A1	50		DZ1	20	
A2	5		DZ2	10	
A3	5		DZ3	6	
DX1	35		DZ4	8	
DX2	35		DY1	75	
DX3	100		DY2	2	
DX4	2		DY3	2	

编写：张人佶（清华大学）
唐果林（北京殷华公司）



附　　录

A　GARPA 成员

Australia's QMI Solutions(QMI)
Mr. Ken Porter, CEO
rpt@qmisolutions.com.au
Mr. Noel Frost
n.frost@qmisolutions.com.au

Canadian Association of Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing
Ms. Vesna Cota, President
vcota@tycoelectronics.com
Mr. Millan Yeung
millan.yeung@nrc.ca

Chinese Rapid Forming Technology Committee
Professor Yongnian Yan, Chairman
dmeyyn@mail.tsinghua.edu.cn

Danish Technological Institute
Mr. Bent Mieritz
Bent.Mieritz@teknologisk.dk

Finnish Rapid Prototyping Association (FiRPA)
Mr. Jukka Tuomi, President
jukka.tuomi@hut.fi
Mr. Hannu Kaikonen
Hannu.Kaikonen@ltk.hut.fi

French Rapid Prototyping Association (AFPR)
Professor Alain BERNARD, Vice President
Alain.Bernard@irccyn.ec-nantes.fr
Dr. Bruno Le Razer
blerazer@poleplasturgie.com

Germany's NC Society
Nico Blessing
nsb@ipa.fhg.de
Michael Junghanss
mjunghanss@alphaCAM.de

Hong Kong Society for Rapid Prototyping Tooling and Manufacturing
Dr. Ian Gibson, Vice-Chairman
igibson@hkucc.hku.hk

Irish Rapid Design and Manufacturing Network
Dr. Michael Murphy
murphymi@tcd.ie

Italian Rapid Prototyping Association (APRI)
Professor Luca Iuliano
iuliano@polito.it

RP Japan



Mr. Igata Tetsuzo
INCS Inc.
mailto: hagi@cmet.co.jp

Korean Society of Rapid Prototyping and Manufacturing
Mr. Dong-Yol Yang
dyyang@mail.kaist.ac.kr

Association for RP Companies in The Netherlands
Mr. Walter Kruf, President
wpmkruf@ascend-modelmakers.com
Mr. Hans Molhoek, Sector Manager
hmo@fme.nl

Rapid Product Development Association of South Africa
Dr. Deon de Beer
ddebeer@tfs.ac.za
Dr. Willie du Preez
wdupreez@csir.co.za

Swedish Industrial Network on FFF
Mr. Berndt Holmer, Coordinator
berndt.holmer@ivf.se

UK's Rapid Prototyping and Manufacturing Association (RPMA)
Mr. Graham Tromans, Chairman
Graham.Tromans@Rover.co.uk
Mr. David Wimpenny
dwimpenny@dmu.ac.uk

USA's Rapid Technologies & Additive Manufacturing (RTAM) **Community of the Society of Manufacturing Engineers** (SME)
Mr. Boris Fritz, Vice Chairman
fritzbo@mail.northgrum.com
Ms. Jane Wellington, Association Manager
jwellington@sme.org

2004 GARPA Host and Chair: Rapid Product Development Association of South Africa

GARPA Advisors:
Mr. Terry Wohlers
Wohlers Associates, Inc.
tw@wohlersassociates.com
Dr. Ian Gibson
University of Hong Kong
igibson@hkucc.hku.hk

GARPA Secretariat:
Jenny van Rensburg
Central University of Technology, Free State
jvrens@tofs.ac.za
Guidelines
for Forming a New Association
GARPA Membership Guidelines



B 国外 RP& RM 主要研究和应用单位

1. 3D Systems. Inc.

Address: Valencia, California
Web: www.3dsystems.com/
E – mail: moreinfo@3dsystems.com

Objectives:

Developing Advanced Rapid Prototyping, Rapid Tooling, and Rapid Part Manufacturing Process Equipment

Processes:

Developing Methods for Use of Highly Viscous Photopolymers Loaded with Metal or Ceramic Powders for use in Stereolithography
Developing Improved SLS Materials
Al – based sintering material in conjunction with University of Queensland, Australia
Mixture of Al and nylon
Nylon binder is burned
Porosity is infiltrated with lower melting point Al alloy
Developing Binder – Coated Stainless Steel Powder
Binder is burned
Porosity in Stainless Steel part is infiltrated with molten bronze

Materials:

SLS Materials
SLA Materials
Ink Jet Materials

Applications:

Multi – Jet Modeling Systems
Invision 3D Printer
Builds parts by jetting Acrylate Photopolymer as build material and a wax for support structure
Announced April 14, 2004
Thermo Jet Printer
SLA Systems
Viper SLA System
SLA 5000 System
SLA 7000 System
SLS Systems
Vanguard SLS System
Vanguard HS SLS System

2.3D Printing Laboratory – Massachusetts Institute of Technology

Address: Cambridge, Massachusetts
Web: me.mit.edu/groups/tdp
Contact: Dr. E. M. Sachs
E – mail: sachs@mit.edu

Objectives: Flexible Manufacturing, Process Innovation and Rapid Prototyping

Processes:

3D Printing (3DP) Technology
First to apply ink – jet technology to produce 3D parts
Moving ink – jet head deposits binder onto a layer of powder
Developed software within Solid Works CAD to vary local composition control (LLC)
Single material with variable properties (i.e. color)
Different materials in a single part
In – depth research being conducted on binders, powder composition, and geometry control

Applications:

Created the following Start – Up Companies
Metal Matrix Cast Composite – Waltham, MA
Commercializes the manufacturing of ceramic pre – forms infiltrated with molten metal
ProMetal Division of Extrude Hone – Irwin, PA
Commercializes ability to process steel parts infiltrated with bronze. Used for tooling.
Z Corporation – Burlington, MA

Commercializes machines to make concept models. First to produce a color 3DP machine.

Soligen Technologies – Northridge, CA

Commercializes the making of castings using 3DP technology to produce complex molds and cores

Specific Surface – Franklin, MA

Commercializes the making of filters using 3DP Technology

Therics – Princeton, NJ

Commercializes the making of medical products such as time – release medications, resorbable scaffolding, and implants for cartilage, tendon, and bone substrates using 3DP Technology

TDK Corporation – Chiba – ken, Japan

3. Advanced Digital Manufacturing SM (ADM)

Address: Enstone, England

Web: www.3dsystems.com/company/contact.asp

Objectives:

Rapid Design and Manufacture of Renault F1 Team Race Car Parts

Processes:

Developed software engine programmed with company's configuration, design, and process details named: "Produce Knowledge Model (PKM)"

Use of 3D Scanners to digitize the solid object

Use of SLA 700 for rapid large part creation

Use of Selective Laser Sintering (SLS) Equipment for rapid part production

Use of Multi Jet Modeling (MJM) Equipment for rapid prototype production

Center created jointly between 3D Systems Corp. and the Renault F1 team

Fabricate low – volume production parts for Renault F1 Team car (Launched 2/21/2003)

Materials:

Metals, Polymers, and Ceramics

Applications:

Rapid Manufactured Parts

Custom Race Car Parts

4. AeroMet

Address: Eden Prairie, Minnesota, USA

Web: www.aeromet.com

E – mail: information@aeromet.com

Objectives: Produce Near – Net Shape Ti Parts for Aerospace Industry

Processes:

Laser Additive Manufacturing (LAM)

Translates customer's CAD file into instructions to fuse multiple layers of Ti powder into a dense part,

CO_2 laser melts Ti powder onto substrate forming fully dense "pre – forms"

Build volume 3 × 3 × 12 meters

Materials: Ti powder

Applications: Ti Aerospace Components

5. Align Technologies, Inc.

Address: Santa Clara, California

Web: www.invisalign.com

Contact: Shannon Henderson

Email: Shannon@ethospr.com

Objectives:

Commercialize the Manufacture and Distribution of Rapid Orthodonic Part Manufacture

Processes:

Developed Commercially Available Orthodonic Alignment System

Utilized 3D Systems, Inc. SLA process

Custom fit, clear plastic alignment dental devices

Applications:

Orthodontic Alignment System and Service

6. Arcam AB

Address: Gothenburg, Sweden

Web: www.arcam.com
Contact: Ulf Lindhe
Email: ulf.lindhe@arcam.com

Objectives:

Develop and Commercialize Rapid Metal Prototype and Rapid Tool Insert Machines

Processes:

Developing Layered Powder Additive Process (Arcam EBM™)

Utilizing electron beam rather than laser beam

Developing scanning pattern recognition methods to control residual stress and distortion

Melting under vacuum

Machine finishing

Materials:

Ti – 6Al – 4V

Ti

Low Alloy Steel

H13 Tool Steel

Ni Alloys

Applications:

Arcam EBM™ Machine

Drill bits

Tooling Inserts

Orthopedic Implants

Automotive Applications

aerospace industry

Functional Metal Prototypes

7. Bremen Institute of Industrial Technology (BIBA)

Address: Bremen, Germany
Web: www.biba.uni – bremen.de
Contact: Barbara Genter
E – mail: gen@biba.uni – bremen.de

Objective: Conduct Research on Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing Systems

Processes:

Developing processes to extrude and trowel a slurry of solids to form parts and building structures (Joint program with University of Southern California)

Laminating shaped Al sheets/plates and steel plates joined by deep penetration **electron beam** welding to form stamping dies

Developing software to adapt Additive/Subtractive for optimizing prototyping and subsequent manufacturing processes

Applications:

RP Workbench Software including (1) Tooling Designer, (2) Tooling Instructor, and (3) Tooling Selector

Spinoff: Marcam Engineering GmbH, Bremen commercializing software developments

8. CMET

Address: kamata, Ohta – ku, Tokyo 144 – 0052, Japan
Web: www.cmet.to.jp
E – mail: hagi@cmet.co.jp

Processes:

Solid Object Ultraviolet Plotter (SOUP)

SL

Materials:

Epoxy

acrylate

9. Buss – Modeling Technology GmbH

Address: Mulheim – Karlich, Germany
Web: www.bmtec.com
http: //www.auto – rlp.de/unternehmen/buss-mueller/
E – mail: info@bmtec.com

Contact: H.J. Buss, G. Krautner

Objectives: Development of a 3D Color Printer



Processes: Based on Technology in Aad van der Geest Patents

Materials:

Polymeric Materials

Applications

Commercialization of 3D Color Printer

10. Concept Laser GmbH

Address: Bayreuth, Germany (Hoffman Group)

Web: www.conceptlaser.de

E-mail: info@conceptlaser.de

Contact: Mr. Frank Duke, Mr. Olive Nobleman

Objectives: Develop Rapid Part Manufacturing Machines

Processes:

Developed a Laser Sintering Process to Produce Fully Dense Parts Using

Laser CUSING (equivalent to Laser Sintering)

Laser Marking

Laser Machining

Utilizes YAG Laser

Build Volume 250 x 250 x 170 mm

Materials:

Stainless Steel Powders

Applications

M3 Linear Machine

Rapid Manufactured Parts

11. Cubic Technologies

Web: www.cubictechnologies.com

Contact: Michael Feyin

Objectives: Selling the Cubic 1015 Plus and Cubic 2030H LOM systems

Processes:

LOM

Materials:

Paper

Source(s): Wohlers 2004 p. 91

12. Clemson University

Address: Clemson, South Carolina

Web: www.ces.clemson.edu/bio/people/boland.htm

Contact: Professor Thomas Boland

Objectives: Conduct Research for Rapid BioMaterial Part Production

Processes:

Studying Protein and Cell Printing

Developing a fully automated printer to deposit

DNA

Proteins

Antibodies onto polymeric supports

Printer deposits live cells

500 nm precision feasible

Tissue engineering supports

Applications:

Rapid BioMaterial Part Production

13. Denken Engineering Co., Ltd

Web: www.denken-eng.co.jp

Email: dksystem@denken-eng.co.jp

Objectives: Manufacturing SL machine and photo-curable resins

Processes: SL

Materials: Epoxy resin, Acrylate



14. Desk Artes

Address: Helsinki, Finland
Web: www.deskartes.com
E-mail: support@deskartes.fi

Objectives: Develop Software for Rapid Part Design and Manufacturing
Processes:

Developing CAD Software
- Stl file generation, manipulation, repair
- Automatic/interactive operation
- Facet editing
- 3D transformations
- Dimensioning
- Separation/joining of connected components, bad components, faces, and parting lines
- Split models into multiple sections
- Other features

Applications: 3D Expert Software
Source(s): WTEC p. 2.13

15. Drexel University

Address: Philadelphia, PA
Web: www.drexel.edu
Contact: Professor Wei Sun
mail: sunwei@drexel.edu

Objectives: Conduct Research on Rapid Prototyping and Scaffolding of BioPolymer Materials
Processes:

Developing Precision Extruded Deposition System (PED)
Current Research
- *Strategies for Heterogeneous Material/Architecture Tissue Scaffolds*
- *Image Guided Cranofacial Reconstructive Surgery*
- *Multi-Nozzle Biopolymer Deposition for FreeForm Fabrication of Tissue Scaffolds*
- *Computer Aided Tissue Engineering*
- *Scaffold Infomatics: Tissue Scaffolds Based on 3D Image Data*
- *Representation and Design of Heterogeneous Structures: Connectivity Study for 3D Tissue Engineering Constructs*
- *Representation and Design of Heterogeneous Structures: Porosity Representation, Feature Decomposition and Asymptotic Homogenization*

Materials: BioMaterials
Applications: Computer-Aided Tissues Construction Processes and Machines

16. DSM Somos®

Address: New Castle, Delaware
Web: www.dsmsomos.com

Objectives:

Conducts Research, Develops, and Markets Materials for the Fabrication of 3-Dimensional Parts described by Digital Data

Processes:

Proprietary Chemical Processes to Produce Photopolymeric and other Prototyping Materials
Advanced Composite Technology for Stereolithography
ACT-SL uses liquid resins incorporating fillers, reinforcements, modifiers, and other additives to achieve composite properties

Materials:

General Purpose Materials - Somos® 7100 series
Materials Mimicking Polyethylene - Somos® 8100 series
Materials Mimicking Polypropylene - Somos® 9100 series
Selective Laser Sintering Materials - Somos® 201
Composite Materials - ProtoTool™ 20 L and NanoForm™

Applications:

Rapid Prototyping in General
Rapid Part Manufacturing in General



Composite Material Applications

17. Envisiontec

Address: Ferndale, Michigan
Web: www.envisiontec.de
Contact: Martin Forth
E-mail: info@envisiontec.de

Objective:
Develop and Commercialize Rapid Biological and Medical Part Production Machines
Processes:
Applied Digital Light Processing (DLP) for Rapid Part Production
Bottom light initiation of photo polymerization via array of 1280 by 1024 micro mirrors of 32 micron resolution (DLP)
Mirrors are computer controlled to determine exposure of photopolymer
Developed Bioplotter
Material is dispensed in a matched plotting medium
Buoyancy forces compensate for gravity forces
Complex structure can be built without supporting structures
Living cells or other bio-active components can be built as 3D scaffolds
Materials: Polymeric Materials, Biomaterials
Applications:
Rapid Manufacture of Custom Hearing Aid Shells and Dental Fixtures
Polymer-based Mold and Part Production
Microsystems
Medical
Dental

18. EOS Finland & Rapid Product Innovations Oy (RPI)

Address: Rusko, Finland
Web: http://www.rapid-product innovations.fi/news/RapidManufacturing.doc
E-mail: seppo.syrjala@rapid-product-innovations.fi
Contact: Seppo Syrjala

Objectives: Rapid Tooling and Rapid Part Manufacturing Equipment Development
Processes:
Utilizing EOS Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Process Developed by EOS GmbH
Materials:
EOS Finland
Developed tool steel H20 for EOSSINT M Machine
Developing Metal Powders for DMLS Process
Applications:
EOS Finland and RPI Partnership to Commercialize Direct Metal Laser Sintering
Injection molding tools
Die casting tooling

19. EOS GmbH

Address: Munich, Germany
Web: info.eos.info
E-mail: info@eos.info

Objectives:
Rapid Tooling, Rapid Part and Rapid Casting Manufacturing Equipment Development
Processes:
Developing Family of Machines to Build Parts in Polymeric, Metallic, and Ceramic Materials
Direct Metal Sintering Process (DLMS)
Direct Casting Mold and Core Manufacture
Materials:
EOS Machines can build parts in
Polystyrene
Polyamide
Glass-filled Polyamide



Foundry Sand
Bronze – based 20 micron powder
Injection – molds
Direct Steel 20
Die – casting tooling
EOS powders are mixtures of metals with varying melt points
EOS powders do not require post processing information

Applications

Cross licensing Agreement with Trumpf to Commercialize Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Process
Applications include Rapid Tools and Rapid Part and Casting Manufacture in a Wide Variety of Materials
Helsinki University of Technology (HUT) is collaborating with Electrical Optical Systems (EOS) and industrial partners to develop applications for EOS' powder bed processing machines

20. Fcubic

Address: Sweden

Objective: Rapid Ceramic Part Production
Processes: Jet printing a catalyst onto a ceramic powder bed
Application: Fcubic Ink Jet machine for Ceramic Part Production

21. Fraunhofer IFAM

Address: Bremen, Germany
Web: http://www.ifam.fhg.de/
E – mail: kra@ifam.fraunhofer.de
Contact: Dipl. Ing. Lutz Kramer

Objectives: Developing Rapid Part Manufacturing Processes
Processes:

Develop a two – binder jetting system for 3D Printing (3DP) technology (Using ProMetal 3D Printer)
Carbon rich binder deposited in a controlled manner
Green part heat treatment allows carbon diffusion and achievement of a predictable hardness/strength gradient
Improving EOS Direct Melting Laser Sintering (DMLS)
Studying the Heating of Powder Beds in Metal EOSINT SLS for Stress Reduction

Materials:

Binder development for 3D Printing
Lasertool: ferrous tool material from DMLS
Density > 99%
Hardness > 320HV
Strength 800 – 900 MPa

Applications: Rapid Part Manufacturing

22. Fraunhofer Institute of Laser Technology

Address: Aachen, Germany
Web: http://www.ilt.fraunhofer.de/
Contact: Lars Brachthauser

Objectives: Conduct Research on Laser Processing of Materials for Rapid Manufacturing
Processes:

Developing Selective Laser Melting (SLM) Processes
Powder – bed direct melting process
No use of intermediate binders
Developing Metal Powder Deposition (MPD) Processes
Five times faster than SLM Process (up to 10 cm^3/min)
Produce large parts but less accurate than SLM parts
Developing powder nozzles, oxygen control, and software for mold repair
Developing Laser Surface Melting Process
Uses high power lasers to improve surface finish to 1.7 – 0.2 μm

Materials:

SLM Materials include Ti – 6Al – 4V, H11 Tool – Steel, 316L Stainless Steel, Co – Cr Alloys
MPD Materials include Co, Ni, and ferrous alloys

Applications:

SLM Machine Commercialized by Trumpf
SLM Applications:
- Functional Prototypes
- Short Run Parts
- Rapid Molds
- Medical Implants
- Tooling Inserts

MPD Applications:
- Tools
- Molds
- Aerospace (Ti, Super alloys)
- Mold Repair

Orthopedic/Craniofacial Implants
Prosthetic Hip Stems

23. Fraunhofer Institute of Production Technology

Address: Berlin, Germany
Web: www.ipk.fhg.de/
E-mail: info@ipk.fraunhofer.de

Objectives:

Conduct Research and Develop Rapid Ceramic and Metal Part Processes and Machines

Processes:

Developing Rapid Ceramic Part Manufacturing by use of Selective Laser Sintering (SLS)
Developing Controlled Metal Build-Up (CMB) Process
- LENS Wet Shaped Processing
- High speed machining of each layer

Materials:

Ceramic Patterns in
- Z12SiO2
- SiO2
- SiC infiltrated with epoxy
- Al2TiO5
- Si3N4

Applications:

Production of Heat Resistant Steel Parts
- Cast in Zirconium Silicate Molds by SLS

Production of Metal Patterns by Spraying onto a Negative SLS Produced Ceramic Pattern

24. Freiburg Materials Research Center

Address: Freiburg, Germany
Web: www.fmf.uni-freiburg.de
E-mail: fmf@fmf.unifreiburg.de

Objective:

Conduct Research to Develop Rapid Manufacturing Systems using Biological Materials

Processes:

Developing NC controlled systems capable of printing biomaterials in a reactive support medium (−50℃ to 150℃) (Joint program with Envisiontec)

Materials:

Calcium phosphate ceramics, degradable polylactic/polyglycolic acid polymers and hydro gels including alginate, agarose, fibrin, and collegen

Applications:

Bioplotter sold by Envisiontec

25. F&S/ MCP GmbH

Address: Lubeck, Germany
Web: www.fockeleundschwarze.de
Contact: Dr. Mattias Fockele, Dr. Dieter Schwarze
E-mail: info@fockeleundschwarze.de

Objectives: Produce Rapid Metal Prototyping and Rapid Metal Production Systems

Processes:

Developing Selective Laser Melting (SLM) Processes
Melts metal powders onto a substrate
Laser output 30 – 200 W
High surface quality of parts produced
No binders required
Fully dense parts

Materials:

Ti
Co – based alloys
Al
Ceramic powders
Stainless Steels
Tool Steels

Applications:

Dental and medical applications
Rapid Metal Prototypes
Rapid Tools for Plastic Injection Molding
Rapid Tools for Die Casting

26. Generis, GmbH

Address: Augsburg, Germany
Web: www.generis.de
E – mail: info@voxeljet.de

Objectives: Rapid Part Manufacturing via Sand Mold/Core Production
Processes: Developing Methods of Ink Jet Printing to Produce Large Sand Molds and Cores
Materials:

Sand and binders
Applications
Rapid Cast Part Production

27. Isotis

Address: Irvine, California, Bilthoven, Netherlands, Lausanne, Switzerland
Web: www.isotis.com
E – mail: infous@isotis.com

Objectives: Developing Ortho Biologics Products
Processes:

Developing and Fabricating Calcium Phosphate Ceramic Scaffolds
  Utilizing Envisiontec Perfactory System
  Create molds using Solid Free Form methods
  Cast Biomaterials into molds
  Create ceramic, polymeric, and composite scaffolds

Applications:

Spinal Fusion
Implants to Enhance Healing of Bone Fractures
Joint Revision
Bone Void Filling
Craniomaxillofacial Surgery
Oral and Periodontal Repair
Bone Graft Substitutions

28. Kira Corporation

Address: Tomiyoshi shinden, Kira – cho Hazu – gun, Aichi Pref 444 – 0515 Japan
Web: www.kiracorp.co.jp

Processes: Paper lamination technology

29. Laser Processing Research Center

Address: University of Manchester of Science and Technology, Manchester, England
Web: www.umist.ac.uk/research/



Objectives:

Conduct Research on Develop Rapid Micro – device Manufacturing and Repair Processes

Processes:

Develop Laser – Based Electrochemical Deposition Systems

Laser controlled local deposition

Laser energy initiates deposition in heated solution

Develop Direct – Write Technologies to Produce Microcircuits

Precursor printed on polymer substrate

Solvent evaporated

Heat treatment results in Ag deposit

Interconnects and circuits produced

Develop methods for Net Shape Repairing of Turbine Blades

Materials:

Chemical materials related to microcircuit and interconnects

Turbine blade materials

Applications:

Rapid Microcircuit Part Manufacturing

Rapid Turbine Blade Repairing

30. Lairdside Laser Engineering Center University of Liverpool

Address: Liverpool, UK

Web: www.lasers.org.uk/

E – mail: info@llec.co.uk

Contact: Dr. Martin Sharp

Objectives: Conduct Research of Laser Processing of Materials for Rapid Part Production

Processes:

Developed LENS – type Machines for Laser Welding of Powder

Graded materials produced

Controlled fluid mechanics and thermal aspects of powder feed nozzles to achieve laminar flow conditions

Argon atmosphere operations < 5 ppm O2

Materials: Ti – 6Al – 4V Alloy

Applications: Rapid Part Production

31. Manchester Materials Science Center

Address: Manchester, England

Web: www.umist.ac.uk/material

Contact: Brian Derby

E – mail: materials@umist.ac.uk

Objective: Conduct Research to Develop Rapid Production Processes

Processes:

Developing Understanding of Jetted Liquid Droplet Behavior

Preparing predictive models of ink – jet printing systems to study:

Droplet velocity

Liquid dynamic viscosity

Liquid surface tension

Improving drop – on – demand Ink Jet additive manufacturing to produce ceramic, polymeric, and metallic parts

Studying loaded suspensions, > 40%, to reduce sintering shrinkage

Developing Metal Cladding System

Investigating differences between gas atomized powders vs. water atomized powders

Gas atomized powders lead to higher porosity and greater surface roughness than water atomized particle object

Developing Direct Cell Printing Systems

Materials:

Variety of materials including

Alumina

PZT

ZrO2

Applications:

Rapid Part Manufacturing Machines and Rapid Parts



32. Meiko

Address: 〒407 – 0105 山梨県甲斐市下今井 732

Mail: info@meiko – inc.co.jp

Web: www.meiko – inc.co.jp

Objectives: Manufacturing SL machine

Processes: SL

33. Microfabrica

Address: Burbank, California

Web: www.microfabrica.com

Contact: Chris Bang

E – mail: CBang@Microfabrica.com

Objectives:

Commercialize large scale production of complex micro – devices by developing and applying advanced manufacturing processes

Processes:

Additive Micro – fabrication Process based on Multi – layer Selective Electro deposition of Metals (EFAB®)

- Stack independently patterned metal layers on top of each other
- Creates intricate 3D complex geometrics with micron – level precision

Materials:

Ni, Cu, Ti, Pt, Au, Perm alloy, Stainless, Etc.

Substrates: Ceramic, metal, glass, silicon, piezo electric, etc.

Applications:

Micro – devices in

- Information technology
- Biotechnology
- Automotive
- Consumer Products
- Chemical Analysis
- Communications
- Industrial
- Other

34. Objet Geometrics Ltd.

Address: Rehovot, Israel

Web: www.2objet.com/

E – mail: info@2objet.com

Objectives:

Commercialize PolyJet(tm) Photopolymer – jetting Technology for the Production of Rapid Prototype Machines

Processes:

Depositing and hardening of photopolymers using inkjet technology

- Dual materials deposited simultaneously
  - *Actual model*
  - *Support for model*
- Layers hardened by UV light
- Water soluble support material
- Compatible with office environment
- 16 micron layers deposited at 600 x 300 dpi
- 8 ink jet head machines

Materials:

Proprietary photopolymer resins

Proprietary support materials

Applications: Rapid concept model production

35. On Demand Manufacturing

Address: Camarillo, California (Subsidiary of Boeing)

Web: www.odm.bz/

Contact: John Wooten



E – mail: john.r.wooten@boeing.com

Objectives:

Mission Statement:

"To be the World's Premier Rapid Manufacturing Company for On – Demand Supply of Low – Volume, or Just – In – Time Production of Engineered Parts"

Processes:

Selective Laser Sintering

Capabilities in 2003 include six Selective Laser Sinter Stations

Tensile bars produced at time of part production to qualify parts produced

Materials:

Powdered metals, ceramics, and polymeric materials consolidated by SLS processing

Applications:

Rapidly Manufactured Parts

Aerospace

Other Engineered parts

36. Optomec Design Company

Address: Albequerque, New Mexico
Web: www.optomec.com
E – mail: info@optomec.com
Contact: Dr. Bruce King

Objectives:

Commercialize Rapid Prototyping, Repair, and Part Manufacturing Machines

Processes:

Developing Laser Engineered Net Shaping (LENS) Process

Additive process to fabricate, enhance, and repair fully dense metal components directly from CAD data.

Nd: YAG laser creates a metal pool into which metal powder is injected. The deposition head writes lines of metal to create a near net shape part according to CAD input.

Developing Maskless Mesoscale Materials Deposition (M^3D)

Produces physical and electronic structures with resolutions down to 10 microns

Deposits electronic inks, pastes, conductive polymers, insulators, adhesives, proteins, and cell suspensions

An aerosol stream is focused, deposited, and patterned onto any planar or non – planar substrate and thermally or photo chemically processed to achieve physical and/or electrical properties near that of the bulk material

Materials:

Materials – LENS

Stainless Steel: 316, 304

Ni – based Super alloys

H13 tool steel

Ti – 6Al – 4V Titanium Alloy

Materials – M^3D

Liquid molecular precursors

Particulate suspension of Barium nitrate, etc.

Silver nitrate

Applications:

Applications – LENS

Repair & Overhaul – LENS 850 – R Machine

Rapid Prototyping

Low – Volume Production

Product Development

Applications – M^3D

High Density Interconnects

IC Packaging and Assembly

Photonics

Fuel Cells

Flat Panel Displays

Micro Sensors

Medical Devices

37. Phenix

Address: Clermont – Ferrand, France



Web: www.phenix – systems.com

Objectives:

Processing metal and ceramic materials

Processes:

Laser sintering

Developing a "digital dentistry" process

PM 100 has a cylindrical build volume of 100 mm diameter × 100 mm

PM 250 has a cylindrical build volume of 250 mm diameter × 300 mm

Materials:

Ceramic powder

Metal powder

Applications:

Ceramic copings

38. Polytechnic Institute of Leiria

Address: Morro do Lena, Alto Vieiro, Portugal

Web: www.ipleira.pt/

Contact: Maria Joao de Almeida

E – mail: migoucha@esta.ipleira.pt

Objectives: Conduct Research on Rapid Polyester Part Production

Processes:

Developing Aero – Thermal Lithography

Uses 2 – photo photopolyermerization

Ultraviolet laser (UV) activate a photo initiator

Infrared laser locally heats resin inducing thermal initiation

Materials: Resins and Polyesters

Applications: Rapid Polyester Part Manufacture

39. POM Group, Inc.

Address: Auburn Hills, Michigan

Web: www.pom.net

E – mail: info@pomgroup.com

Objectives:

Commercialize Rapid Tool Manufacturing and Rapid Tool Repair and Modification Processes

Processes:

Applying high performance metallic coatings to create metal parts/tooling and/or repair/modify parts/tooling using powdered metal and laser cladding techniques called Direct Metal Deposition (DMD)

CO2 laser and powder feed system produce thin metal layers

Requires finish machining or other finishing processes

Creates multiple material layers or gradient structures

Fully dense parts produced

Developed originally at University of Michigan (DOE sponsored project)

Materials:

Cr – Cu alloy

Steel alloys

Applications

Rapid Tools

Rapid Metal Prototypes

Tool Repair/Restoration

Additive Changes to Existing Tools

Conformal Cooled Tooling

Embedded Heat – conductive Materials

Surface Hard facing

40. ProMetal Division

Address: Irwin, Pennsylvania

Web: www.prometal – rt.com

Contact: Bill Miller

E – mail: Bill.Miller@extrudehone.com



Objectives:

Produce Rapid Metal Prototyping and Rapid Metal Production Systems

Processes:

Rapid Casting Technology:

Acquired the sand technology from Generis GmbH

Manufacture the S15 sand – based system

Producing parts as large as 1500 × 750 × 750mm

Liquid polymeric binders ink jetted onto a metal powder bed using an electrostatic inkjet print head

Each layer hardened consecutively

Unbound powder acts as support permitting overhangs and undercuts

Accuracy to 0.125 mm (0.005 inch)

Post sintering and infiltration results in high density 60% steel, 40% bronze component

Materials:

Stainless Steel Powders – 316L, 420

Other Powders

Foundry sand

Applications:

Rapid Tooling

Plastic Injection Molds

Lost Foam Tooling

Conformal Cooled Tooling

Rapid Metal Prototypes

Casting Shells and Casting Cores

41. RSP Tooling

Address: Solon, Ohio

Web: www.rsptooling.com

Contact: James R. Knirsch

E – mail: knirsch@sprynet.com

Objectives: Commercialize Rapid Tooling Process Machines

Processes:

Thermal Spray Deposit Metal onto a Rotating Ceramic Negative to Build Up a Functional Tool

Ceramic negative can be cast onto SLA polymeric positive

High velocity gas stream shears molten droplets into fine droplet dispersion for good part replication

Materials:

Most materials with stable molten phase

Applications:

Rapid Tooling

Rapid Part Manufacture

Rapid Functional Prototype

42. Sanders Design International, Inc.

Address: Wilton, New Hampshire

Web: www.sandersdesign.com

E – mail: rolf@sanders.com

Objectives:

Develop and commercialize the production of precision prototype patterns for tooling applications and jewelry manufacturing

Processes:

Micro – Droplet™ Fabrication (MDF) process

Deposits fine droplets of wax and a support material that can be removed in post processing operations

Each layer of deposit is machined to control part precision and geometry

Materials:

Developed formulation for Rapid Tooling using

Polymers, Ceramics, Metals

Applications:

Rapid Tooling

Lost wax patterns for Jewelry Industry



43. Sandia National Laboratories

Address: Kirland Air Force Base, Albequerque, NM
Web: www.sandia.gov/materials/sciences
E-mail: mfsmith@sandia.gov
Contact: Mark Smith

Objectives:

To Support Advanced Technology Development for USA Defense Applications

Processes:

Developing Thermal Spray Processes

Molten droplets of metals, ceramics, glasses, and/or polymers sprayed onto a surface

Advancing the Development of Cold Spray Process (Originally Developed in Russia)

Solid powder particles at or near room temperature are accelerated to velocities in the range of 500 to 1500 miles/sec in supersonic gas jet and cold bonded on a substrate upon impact

Applying Laser Diagnostic Systems to Measure Size, Velocity, and Temperature of Individual Particles

Applications:

Aerospace
Power Generation
Petrochemical
Automotive
Marine
Biomedical
Computer
Electronics
Paper Making
Printing
Textiles

44. Solidica

Address: Ann Arbor, Michigan
Web: www.solidica.com
E-mail: ssadler@solidica.com
Contact: Steve Sadler

Objectives:

Develop and Commercialize Processes for Rapid Tooling and Rapid Part Manufacturing Machines

Processes:

Developing Ultrasonic Consolidation (UC) Process Combining Ultrasonic Welding and CNC Milling to Fabricate Aluminum Alloy Tape into Rapid Tooling/Parts

Al alloy tape (25mm x 0.1mm) ultrasonically welded together to consolidate/fabricate a shape
Use low-melting materials for support structures
Support structures melted away after fabrication.
Reduced need for Electrical Discharge Machining (EDM) for finishing
RPCAM Software generates machine tool path to machine final shape

Studying encapsulating optical fibers, sensors, or printed circuits within a metal structure
Studying embedding powders or meshes such as Ti or Steel to improve part strength

Materials:

Currently - Aluminum Alloys
Future - Stainless Steels
Ferrous Materials
Brass
Ni-based Alloys
Ti Alloys

Applications:

Tooling (i.e. thermoforming, et. al.)
Repair Aircraft Parts
Encapsulating optical fibers, sensors, and printed circuits with metal structures
Embedding powders, meshes



45. Solidimension

Address: Beit Shraga Katz, Beerot Yitzhak, ISRAEL, 60905
Email: info@solidimension.com
Web: www.solidimension.com
Contact: Mr. Yair Aloni

Objectives:

Manufacturing RP Machine suitable for using in office environment and severs as 3D printer. The typical machine is SD300 which fuses layer upon layer of PVC sheets.

Processes

Using sheeting lamination technology, SD300 fuses PVC sheets layer by layer to make a part.

Materials:

PVC plastic

46. Solidscape

Address: 316 Daniel Webster Highway, Merrimack, NH, USA
Web: www.solid_scape.com
E-mail: precision@solid-scape.com

Objectives:

Producing relatively small wax patterns for secondary processes, such as investment casting or silicone rubber molding

Processes:

Jet a proprietary thermoplastic for pattern creation and a dissolvable support material to support cavities, overhangs and undercuts
Easy-to-dissolve wax support: no post-build benchwork
Fine feature detail can be produced without the breakage
T612 system build envelope: 30.48 × 15.24 × 15.24cm

Materials:

Wax
Thermoplastic

Applications:

Dental and orthodontic
Medical service, such as titanium spinal implants
Jewelry

47. Sony / D-MEC

Address: 5-6-10 Tsukiji, Chuo-ku, Tokyo 104-0045 JAPAN
E-mail: tokyo@d-mec.co.jp
Web: www.d-mec.co.jp

Objectives:

Sales and maintenance of Solid creation system (SCS molding system)
Commissioned manufacturing of 3-D models (D-MEC modeling)
Design of direct molds, mold modeling, and commissioned manufacturing of injection-molded models
Sales of UV curable resin (DESOLITE)

Processes:

Solid Creation System (SCS)

Materials:

Epoxy resin
Acrylate

48. Speed Part

Address: Moinlyke, Sweden
Web: Http://www.speedpart.se/
E-mail: sales@speedpart.se
Contact: Ralf Larson

Objectives: Rapid Plastic Part Manufacturing

Processes:

Developing Plastic Powder Sintering Process for High-Volume Plastic Part Production
Infra-radiation curing of plastic through a printed mask
Cycle times approximate 10 seconds for 0.1 mm layer thickness
Entire layer exposed in one operation

Materials:

Nylon

Application:

Rapid Plastic Part Production Machine

Build volume: 200 x 300 x 500 mm

49. Stratasys

Address: Eden Prairie, Minnesota
Web: www.stratasys.com
E－mail: info@stratasys.com

Objectives: Commercialize Fused Deposition Modeling Produce Rapid Prototypes

Processes:

Fused Deposition Modeling Process forms a polymer part by extruding a polymer filament through a heated computer position controlled nozzle

Materials:

Polymeric Materials with suitable Glass Transition Melting Characteristics

ABS (acrylonitrile butayrene styrene) used in all machines

Applications:

Rapid Prototyping Concept Modeling
Soft Tooling
Functional Prototypes
Master for Investment and Lost－Wax Casting

50. TNO Applied Scientific Research

Address: Delft, Netherlands
Web: www.ind.tno.nl
Email: wegwijzer@tno.nl

Objectives:

Conduct Research and Commercialize Rapid Tooling (RT) and Rapid Manufacturing (RM) Processes

Processes:

Studying curing parameters of Ink Jet printed parts
Developing Ink Jet heads to deposit high viscosity materials
Developing capability to print slurries, dispersions, and pastes from polymeric, metallic, or ceramic materials for "Micro－SLS"

Materials:

High viscosity materials printable by Ink Jet
Materials for 'Micro－SLS' based on dispersions

Applications:

STL Draft Angulator™: Software to design molds with stl files
Flash TL Engineer™: Mix of stl tools and 2D drawings

51. TNO Industrial Technology

Address: Eindhoven, Netherlands
Web: www.ind.tno.nl

Objectives:

Conduct Research and Commercialize Rapid Tooling (RT) and Rapid Manufacturing (RM) Processes

Processes:

Developing New Rapid Prototyping Software and Processes
Adapting Fused Deposition Modeling (FDM) process to create biological scaffolds to grow heart tissue, spinal discs, and orthodics

Materials:

Industrial Materials, Bio Materials

Applications:

First Color Printer, Rapid BioPart Manufacturing

52. Trumpf

Address: Ditzingen, Germany
Web: http://www.trumpf.com/

Objectives:

Rapid Tool and Rapid Part Manufacturing



Processes:

Developing a variation of Direct Melting Laser System: TrumaForm LF

Direct Metal Laser – Melting (DMLM)

Cross licensed from Electro Optical Systems – EOS GmbH

Based on Technology developed at Fraunhofer Institute of Laser Technology (Aachen, Germany)

Formed a joint development agreement with POM to develop and manufacture the DMD 505 system, which is called the TrumaForm DMD 505

Materials:

DMLM powder is free of binder or fluxing agents

Applications:

DMLM Produces Tools and Parts

53. University of Liverpool

Address: Liverpool, UK
Web: www.liv.ac.uk/
E – mail: business@liverpool.ac.uk
Contact: Dr. Chris Sutcliffe

Objectives:

Conduct Research to Develop Rapid Part Manufacturing Processes

Processes:

Developing Cold Gas Dynamic Manufacturing (CGDM) Process

Al particles cold sprayed at 1500 m/sec in a supersonic gas jet without use of a heat source

Kinetic energy results in welding of particles onto substrate

Capable of combining dissimilar materials to produce one component

Materials:

Aluminum

Other unspecified materials

Applications:

Rapid Parts

54. University of Loughborough

Address: Borough of Charnwood, UK
Web: www.aisu.lboro.ac.uk
Contact: David Walley
E – mail: d.c.whalley@lboro.ac.uk

Objectives:

Develop Rapid Manufacturing Processes

Processes:

Develop Rapid Tooling by Cut and Stacking Mold Sections with Conformal Cooling Channels

Develop Additive Manufacturing Processes to Produce Textiles

Explore development of smart textiles with built – in functionality

Develop CAD model for SLS formation of Duraform material as interlocking ring elements

Develop CAD Software to Facilitate Turbine Blade Repairs

Develop Methods for Foot Scanning and Conversion to CAD Models

Develop Ultrasonic Consolidation (UC)

Combines ultrasonic seam welding and layered manufacturing processes

Using Solidica's Formation 2436 process

Targeting Rapid Tooling

Developing Cost Models for Rapid Manufacturing vs. Traditional Manufacturing Processes:

Developing Hydroxyapatite (HA) Ceramic Scaffolds for Medical Applications using SLS

Developing Large Additive Fabrication Making for Fabrication of Building – Size Structures (Joint with University of Southern California)

Applications:

Rapid Tooling

Repair of Turbine Engine Blades

Advanced Textile Manufacturing

Rapid Part Manufacturing

55. University of Nottingham Institute of Materials Technology

Address: Nottingham, UK

Web: www.nottingham.ac.uk/

Objectives:

Conduct Research on Rapid Tooling and Part Manufacturing Processes

Processes:

Develop Rapid Tooling Processes using Cut and Stack Mold Formation Technologies

Variable thickness plates used to minimize stair – step inaccuracies

Develop Laser Cladding Technologies to Deposit Metals and Build Features

Develop CAD Software to Generate stl files and a Machining and Grinding Plan

Develop Cold Spray Technology

Spray solid particles at high velocity on substrate

Develop High Velocity Day – Fuel (HVDF) Thermal Spray Process

Materials:

Clad Materials include P20, stainless steels, Ti Alloys, and Nickel – based Alloys

Substrate Materials are Carbon and stainless steels

Cold Spray Depositions of Al and Ti

HVOF Materials are Tungsten – Carbon – Cobalt and Aluminum – Tin Materials

Applications:

Rapid Prototyping

Laminated Tooling

Rapid Injection Mold Tooling

Rapid EDM Electrodes

Repair of Turbine Engine Blades

56. University of Southern California Rapid Prototyping Laboratory

Address: Los Angeles, California

Web: www – rcf.usc.edu/ ~ khoshnev/RP/RP – Top – Page.htm

E – mail: khoshnev@rcf.usc.edu

Contact: Professor B. Khoshnevis

Objectives:

Conduct Research for the Development of New Rapid Prototyping and Structure Production Technologies

Processes:

Developing Contour Crafting (CC) Process

Layer – by – layer deposition of materials combined with automated troweling to fabricate parts and structures with superior surface finish

Potential for building of civil structures including homes

Studying construction of structures on Moon and Mars

Studying creation of large ceramic art structures

Studying deposition of piezo electric actuators and construction materials

Developing Selective Inhibition Sintering (SIS) Process

Entire layer of powder sintered by high intensity heat (i.e. infrared heater) after selectively ink jetting inhibiting material onto layer sections not intended for sintering

Faster than Selective Laser Sintering (SLS)

Less shrinkage due to reduced binder requirements

Materials:

Contour Crafting

Any material that can be nozzle deposited (i.e. drywall, cement, clay, polystyrene)

Selective Inhibition Sintering

Metal powders (i.e. Cu, etc.)

Polymer powders

Applications:

Contour Crafting

Ceramic part manufacture (i.e. piezo electric actuators)

Construction of Civil Structures (i.e. houses)

Selective Inhibition Sintering

Rapid Part Manufacturing

57. Voxeljet Technology GmbH

Address: Augsburg, Germany
Web: www.generis.de
Contact: via website
E - mail: info@voxeljet.de

Objectives:

Produces Sand Molds and Cores for Rapid Cast Metal Prototype Manufacture

Processes:

Ink Jet Printing of Binders to Create Sand Molds and Cores

Materials:

Silica sand cores and molds
Furan binded sand cores and molds

Applications:

Rapid Cast Metal Functional Prototypes
Primary for Automotive Application to Date

58. Z Corp

Address: Burlington, Massachusetts, USA
Web: www.zcorp.com/products/materials.asp
E - mail: sales@zcorp.com
Contact: Ms. Marina I. Hatsopoulos, CEO

Objectives:

Develop Rapid Prototyping and Rapid Tooling Machines

Processes:

Licence Holder of MIT 3D Printing Patents (Inventor: Prof. E.M. Sachs)
Developing Commercial Improvements on MIT Patent
Developing First Commercial 3D Color Printer
Developing Processes to Infiltrate Parts to Improve Mechanical Properties

Materials:

Plaster - based Materials
Composite - based Materials for Metal Casting (Z Cast)
Starch - based Materials
Composite - based Materials for Materials with Melting Temperatures Exceeding Al
Infiltrant Materials

Applications:

Concept Modeling
Finite Element Analysis
Functional Testing
Metal Casting
Presentation Models

C　国内 RP& RM 主要设备制造单位

1. 北京殷华激光快速成形与模具技术有限公司

地址: 北京市海淀区成府路华清商务会馆 1003B
邮编: 100083
联系人: 颜旭涛、郭戈、唐果林
E - mail: service@rpyinhua.sina.net
网址: http: //www.rpyinhua.com

主要产品:

1) MEM 系列熔融挤出成形系列设备（MEM200，MEM300，MEM350，MEM600），精度 ±0.15 mm/100 mm ~ ±0.2 mm/100 mm。
2) 激光光固化成形设备，AURO - 350，精度 ±0.15 mm/100 mm。
3) 多功能成型设备（LOM 工艺和 MEM 工艺）。
4) 快速制模设备、快快成型设备专用耗材的生产及销售
5) 逆向工程和结构分析，协助客户进行产品开发设计，模具可行性分析。
6) 快速模具制造，快速原型制造（塑料件、纸基件、树脂件）



7）小批量生产金属、合金铸件、冲压件、塑料件

2. 北京隆源自动成型系统有限公司

地址： 中国 . 北京朝阳区小营路 8 号松竹大厦 A－2F 座

邮编： 100101

网址： http：//www.lyafs.com.cn/gsjj.htm

主要产品：

AFS－320 和 AFS－450 系列选区激光粉末烧结（SLS）快速成型机

快速原型的应用加工服务

3. 武汉滨湖机电技术产业有限公司

地址： 湖北省武汉市华中科技大学快速成型楼（东八楼东楼）

邮编： 430074

网址： http：//www.binhurp.com

主要产品：

1）HRPS 系列（SLS）粉末烧结快速成形机

2）HRPL 系列（SLA）光固化快速成形机

3）HRP 系列薄层快速成形机

4）真空浇注成形机

4. 陕西恒通智能机器有限公司

地址： 西安交通大学

网址： http：//www.china－rpm.com

联系人： 王伊卿

E－mail： market@china－rpm.com service@china－rpm.com

主要产品：

SPS、LPS、CPS 激光快速成形机

光敏树脂

电铸成形机

真空浇注成形机

金属喷涂机

5. 上海联泰科技有限公司

地址： 上海市宜山路 1700 号

邮编： 201103 电话：021－64050102，54581897，64345098 传真：021－64050169

网址： http：//www.union－tek.com

主要产品：

RS350H 光固化快速成形机

美国 DSM SOMOS 的中国代理。

比利时 Materialise 软件中国代理

6. 上海富奇凡机电科技有限公司

地址： 上海市柳州路 600 弄 5 号 1406 室

邮编： 200233

联系人： 李先生

网址： http：//www.fochif.com

E－mail： support@fochif.com

主要产品：

TSJ 型塑料熔覆式快速成型机

7. 精技机电（上海）有限公司

地址： 上海市凯旋路 **3131** 号明申中心大厦 **1703** 室

邮编： **200030**

Email： kms@kinergy.com.cn

网址： http：//www.kinergy.com.cn



32

8. 北京北方恒利科技发展有限公司

地址： 北京市海淀区中关村南大街17号3号楼（韦伯时代中心C座）1004室
邮编： 100081

主要产品：

HLP－350I激光烧结快速成型机设备及多种粉末烧结材料

编写：J. Keverian（Drexel Univesity）
张人信（清华大学）



参考文献

1 颜永年，张伟，卢清萍等．基于离散-堆积成形概念的RPM原理与发展．中国机械工程，1994，5（4）：64～66

2 Yongnian Yan，Jianguo Wang，Yaohua Wu．Modern Shaping Science and Rapid Prototyping Processes．In：Proceedings of the 1995 IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing．Beijing，1995，300～304

3 Yongnian Yan，Zhaohui Du，Jianguo Wang．Rapid Prototyping and Manufacturing（RP&M）Technology and its Integration with CIMS．In：Proceedings of the sixth Chinese – Polish Conference Computer Aided Design in Machinery．Warsaw，Poland，1996，88～95

4 Yongnian Yan，Wanlong Wang，Renji Zhang，et al．Rapid Prototyping and Tooling in China．In：David L．Bourell，Joseph J．Beaman，Richard H．Crawford，et al．eds．Solid Freeform Fabrication Proceedings．Austin：The University of Texas at Austin，1999，873～881

5 Yan Yongnian，Hong Guodong．Development and Tendency of Rapid Prototyping Technology．In：Shu – Sen Deng，S．C．Wang eds．Laser Processing of Materials and Industrial Ⅱ．Washington：SPIE – The International Society for Optical Engineering，1998，298～306

6 颜永年，张人佶．快速成形技术国内外发展趋势．电加工与模具，2001，（1）：5～9

7 颜永年．快速成形技术发展的新趋势．计算机辅助设计与制造，2002，（3）：5～9

8 颜永年，单忠德主编．快速成形与铸造技术．北京：机械工业出版社，2004

9 T．Wohlers．Rapid Prototyping and Tooling State of the Industry 1999 Worldwide Progress Report．Wohlers Associates，Inc．，1999

10 T．Wohlers．Rapid Prototyping and Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report．Wohlers Associates，Inc．，2000

11 T．Wohlers．Rapid Prototyping and Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report．Wohlers Associates，Inc．，2001

12 T．Wohlers．Rapid Prototyping and Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report．Wohlers Associates，Inc．，2002

13 T．Wohlers．Rapid Prototyping and Tooling State of the Industry Annual Worldwide Progress Report．Wohlers Associates，Inc．，2003

14 T．Wohlers．Rapid Prototyping，Tooling and Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report．Wohlers Associates，Inc．，2004

15 颜永年，张人佶，林峰等．快速原型技术的发展与未来．见：云南省科技学术交流中心编．快速成型与快速制造．北京：原子能出版社，2004：1～5

16 颜永年，张人佶．美国快速原型制造技术的最新进展．电加工，1998，2：9～12

17 Cherles．Hull，Michael Feygin．Rapid Prototyping：Current technology and Future Potential．Rapid Prototyping Journal，1995，1（1）：11～19

18 Dickens．Research Developments in Rapid Prototyping．Journal of Engineering Manufacturing，1995，209：261～266

19 Anna Kochan．Rapid Growth for Rapid Prototyping．Assembly Automation，1997，（3）：215～217

20 Anna Kochan．Rapid Prototyping Wins Widespread Acceptance．Assembly Automation，1997，（3）：218～221

21 Andreas Gebhardt．Rapid Prototyping werkzeüg fur die schnelle prodaktentwicklung．Card Hanser Verlag München Wien，1996

22 丸谷洋二，大川和夫编．光造型法．日刊工业新闻社，1990

23 Joseph J．Beaman，Joel W．Barlow，et al．Solid Freeform Fabrication a New Direction in Manufacturing．Kluwer Academic Publishers，1997

24 朱林泉，白培康，朱江淼．快速成型与快速制造技术．北京：国防工业出版社，2003

25 罗宏杰，王秀凤．快速原形制造技术．北京：中国轻工业出版社，2001

26 张伟，洪国栋，颜永年等．成形能量场与离散化堆积成形一般模型初探．中国机械工程，1997，8（5）：18～20

27 王笠，张人佶，颜永年．快速成形工艺的描述和分析方法．清华大学学报，2002，42（4）：505～508

28 戚昌滋主编．现代广义设计科学方法学．北京：中国建筑工业出版社，1996

29 戚昌滋，侯传绪．创造性方法学．北京：中国建筑工业出版社，1995

30 丁预展主编．离散论方法学．北京：中国建筑工业出版社，1996

31 马振华编．离散数学导引．北京：清华大学出版社，1993

32（美）尼葛洛庞帝著．数字化生存．胡泳，范海燕译．海口：海南出版社，1997

33 王宏庆．离散技术在RP数据转换和处理中的应用：[学士学位论文]．北京：清华大学机械系，1997

34 王刚，颜永年，卢清萍等．用于快速原型技术中的CAD研究．中国机械工程，1994，5（6）：15～16

35 Zhaohui Du，Renji Zhang，Yongnian Yan．Study of Rapid Intelligent tooling System Based on RPM Technology．In：S．T．Tan，T．N．Wong，I．Gibson eds．HongKong：The University of HongKong，1997，284～289

36 朱君，颜永年，卢清萍等．基于CLI标准的通用快速填充软件研究．中国机械工程，1997，8（5）：47～49

37 Yongnian Yan，Qingping Lu，Renji Zhang，et al．Numerical Jetting Rapid Prototyping manufacture．In：AFPR ed．8th European Conference on Rapid Prototyping and 3th GARPA Gloable Summit．2000，110～120

38 Yan Yongnian，Zhang Renji，Hong Guodong，et al．Research on bonding of material paths in melted extrusion modeling．Materials and Design，2000，21（1）：93～99

39 郭戈，卢清萍，颜永年．快速原型数据处理及工艺规划软件．CAD/CAM计算机辅助设计与制造，2000，（9）：10～12

40 郭戈，颜永年，卢清萍等．FDM工艺支撑的添加．中国机械工程，2000，11（10）：11～13

41 Lin F，Sun W，Yan YN．A decomposition – accumulation model for layered manufacturing fabrication．Rapid prototyping jour-



nal，2001，7（1）：24～31

42 Lin F，Sun W，Yan YN. Optimization with minimum process error for layered manufacturing fabrication. Rapid prototyping journal，2001，7（2）：73～81

43 张伟. 快速成型系统设计与工艺控制的原理与应用：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，1997

44 冯伟. 快速成型系统的软件系统研究：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，1996

45 王万龙. 分层实体制造技术研究：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，1996

46 郭海滨. 基于功能集成的多功能快速成形系统的研究与开发：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，1997

47 林峰. 分层实体制造工艺原理及系统开发：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，1997

48 洪国栋. 熔融挤压堆积成形关键理论研究与系统开发：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，1998

49 王建国. 基于快速成形技术的快速及反馈设计技术研究：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，1996

50 朱君. 适应性快速 RP－CAPP 系统研究：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，1999

51 吴任东. 高速熔融挤压成形工艺及设备研究：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，2000

52 郭戈. RP－CAPP 系统的研究与开发：[博士学位论文]. 北京：清华大学机械系，2001

53 李卫. 快速成形中齿形支撑结构的自动生成算法研究：[硕士学位论文]. 北京：清华大学机械系，2003

54 朱君，郭戈，颜永年. 快速成形制造中基于模型连续性的快速分层算法研究. 中国机械工程，2000，11（5）：549～554

55 Zhu Jun，Yan Yongnian，Lu Qingping，et al. Automatic and Robust Support Structure Generation Based on One－dimensional Boolean Operation. In：Yan Yongnian ed. Proceedings of 1st Int. Conf. on RPM. Xi' an：Shanxi Science and Technology Press，1998，250～258

56 李治钧，陈国定，赵武. 计算机辅助工艺设计. 成都：成都科技大学出版社，1997.

57 Sreeram，P. N.，Dutta，D. Determination of Optimal Orientation Based on Variable Slicing Thickness in Layer Manufacturing. Technical Report UM－MEA－94－14. The University of Michigan，Ann Arbor，MI，1994

58 Kim，J. Y.，Lee，K.，Park，J. C. Determination of Optimal Direction in Stereolithography Rapid Prototyping. Technical Report，Department of Mechanical and Production Engineering，Seoul National University，Seoul，Korea，1994

59 Seth，A.，Dutta，D. On the Computation of Part Orientation Using Support Structures in Layered Manufacture. Technical Report，UM－MEAM－TR－94－15. The University of Michigan，Ann Arbor，MI，1994

60 W. Cheng，J. Y. H. Fuh. Multi Objective Optimization of Part Building Orientation in Stereolithography. Rapid Prototyping Journal，1995，1（4）：12－23

61 Suh，Y. S.，Wozny，M. J. Adaptive Slicing of SFF Processes. In：Proceedings of the 5th International Conference on Rapid Prototyping. Dayton：University of Dayton Dayton，1994，404～411

62 Seth Allen，Deba Dutta. Determination and Evaluation of Support Structures in Layered Manufacturing. Journal of Design and Manufacturing，1995，（5）：153～162

63 G. Fadel，D. Crane，L. Dooley，R. Geist. Support Structures Visualization in a Virtual Reality Environment. In：Proceedings of the 4th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing，Belgirate，Italy，1995，123～130

64 L. Flach，R. Chartoff. Stereolithography Process Modeling—a Step Towards Intelligent Process Control. In：Proceedings of the 3rd International Conference on Rapid Prototyping，Dayton：University of Dayton，1992

65 R. T. Farouki. Path Planning with Offset Curves for Layered Fabrication Process. Journal of Manufacturing Systems，1995，14（5）：355～368

66 宾宏赞. 生长型制造中薄层分形扫描路径的生成和控制系统. 中国机械工程，1998，9（12）：52－54

67 赵万华. 光固化快速成形技术中复杂零件型面精度形成机理研究. 中国机械工程，1997，8（5）：35～36

68 王军杰. 激光快速成形加工中扫描方式与成形精度的研究与实验. 中国机械工程，1997，8（5）：54～55

69 Junghoon Hur，Kunwoo Lee. Efficient Algorithm for Automatic Support Structure Generation in Layered Manufacturing. In：Proceeding of 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference. Irvine，CA，1996

70 Junghoon Hur，Inhaeng Cho，Heesuk Kang，et al. RapidWorks98：A Workbench for STL－Based Rapid Prototyping Systems. In：Proceedings of the First International Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing ' 98. Beijng，1998，236～244

71 Kunwoo Lee，Junghoon Hur，and Giniung Kim. Computing Environment to Determine Optimal Part Orientation for Stereolithographic Rapid Prototyping. Joint Australia－Korea Workshop on Manufacturing Technology，1995

72 Woo－jong Lee，Yong－han Lee，Yoo－suk Hong. Geometric Conversion procedure for Rapid Prototyping System. Journal of Design and Manufacturing，1992，2：83～92

73 Sara McMains. Double Sided Layered Manufacturing. In：Proceedings of 2002 Japan USA Symposium on Flexible Automation. Hiroshima，Japan，2002

74 W. Cheng. Multi Objective Optimization of Part Building Orientation in Stereolithography. Rapid Prototyping Journal，1995，1（4）：12～23

75 Kirschman，C. F.，Gara－Almonte，C. C.，Bagchi，A.，et al. Computer Aided Design of Support Structures for Stereolithographic Components. In：Proceedings of the 1991 ASME Computer in Engineering Conference. Santa Clara，CA，1991. 443～448

76 Kirschman，C. F. Automated Support Structure Design for Stereolithographic Parts：[M]. Clemson：Dept. of Mechanical Engineering，Clemson University，1991

77 W. Vancraen. Support Generation for Rapid Prototyping. In：Proceedings of the 4th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing. Belgirate，Italy：1995，115～122

78 Webb，D. Computer－Aided Support－Structure Design for SLA Models. In：Proceedings of the 5th International Conference on Rapid Prototyping. Dayton：University of Dayton，1994，221～228

79 P. F. Jacobs. Rapid Prototyping & Manufacturing：Fundamentals of Stereolithography . Dearborn：ASME Press，1992

80 张定军. 光固化成形涂层工艺研究及其在功能陶瓷材料中的应用：[博士学位论文]. 北京：清华大学，2004

81 王本，沈树群. 激光扫描和光盘技术. 北京：北京邮电



学院出版社. 1990

82 A. L. Cohen. Resin film recoating method and apparatus. US Pat. 5, 096, 530, 1992

83 P. F. Jacobs, J. S. Thompson, H. D. Nguyen, and D. R. Smalley. Vibrationally enhanced stereolithographic recoating. US Pat. 5, 693, 144, 1997

84 K. Renap, J. P. Kruth. Recoating issues in stereolithography. Rapid Prototyping Journal. 1995, 1 (3): 4 ~ 16

85 M. Gilio, J. P. Kruth, P. Vanherck. High - speed curtain recoating for stereolithography. Solid Freeform Fabrication Proc., 2001, 46 ~ 54

86 T. A. Almquist, C. W. Hull, B. Modrek, et al. Recoating stereolithographic layers. US Pat. 6, 048, 487, 2000

87 赵万华, 李涤尘, 柯映林. 光固化快速成形中树脂涂层技术研究. 中国机械工程, 1999, 10 (12): 1333 ~ 1335

88 赵万华, 杨来侠, 李涤尘等. 快速成型机中的树脂液面刮平装置研究. 西安矿业学院学报. 1997, 17 (1): 44 ~ 46

89 李卫. 快速成形中齿形支撑结构的自动生成算法研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 2003

90 王青岗. 牙颌光固化快速成形制造工艺优化研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2005

91 J. C. Nelson. Selective laser sintering: A definition of the process and empirical sintering model [Dissertation], Univ. of Texas, 1993

92 冯涛, 李志刚. 快速成形与快速制模技术的最新发展 —— Euro Mold' 2003考察报告, 模具工业, 2004, (4): 3 ~ 5

93 赵保军. 选择性激光烧结快速成形工艺建模与优化研究: [博士学位论文]. 北京航空航天大学, 2002

94 Renji Zhang, Guanghua Sui, Guang Zeng, et al. Study on scanning process of selective laser sintering (SLS). Proceedings of the first international conference on rapid prototyping & manufacturing, 1998, Beijing. Yongnian Yan, Renji Zhang, Ping Wang, et al eds. Shanxi Science and Technology Press, 1998, 72 ~ 75

95 Renji Zhang, Guanghua Sui, Liang Guan, et al. Selective laser sintering (SLS) and its materials. Proceedings of the first international conference on rapid prototyping & manufacturing, 1998, Beijing. Ed. Yongnian Yan, Renji Zhang, Ping Wang, Yiping Tang. Shanxi Science and Technology Press. 506 ~ 514

96 冯涛, 孙建民. 用于选区激光烧结的成形材料. 中国机械工程, 2000, (11): 95 ~ 96

97 白俊生, 唐亚新, 余承业. 激光烧结粉末快速成形铺粉辊筒运动参数的分析研究. 航空精密制造技术, 1997, 33 (4): 15 ~ 17

98 白培康, 朱林泉, 程军等. 复合有机材料激光烧结成形性能试验研究. 华北工学院学报, 1999, 20 (1): 1 ~ 4

99 曹明翠, 郑启光, 陈祖涛等编著. 激光热加工. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995

100 林瑞泰 著. 多孔介质传热传质引论. 北京: 科学出版社, 1995

101 王补宣. 工程传热传质学: 上册. 北京: 科学出版社, 1998

102 M. F. Modest. Radiative Heat Transfer. McGraw - Hill: New York, 1993

103 李宝明, 邱复生, 李涤尘等. 激光烧结金属粉末制造微型机械的研究. 中国机械工程, 2000, 11 (12): 1391 ~ 1393

104 吴良伟. CAD模型驱动高聚物熔融挤压快速成形技术研究: [博士学位论文] 北京: 清华大学, 1998

105 徐健. 桌面化熔融挤压快速成形系统的研究与实现: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2002

106 [德] C·劳温代尔. 塑料挤出. 北京: 中国轻工业出版社, 1996

107 益小苏. 高分子材料的制备与加工. 杭州: 浙江大学出版社, 1997

108 贾毅. 计算机模拟机头内塑料熔体的流动状态. 中国塑料, 2000, 14 (3): 49 ~ 52

109 洪国栋, 张伟, 吴良伟等. 熔融材料堆积成形技术及其应用. 机械工业自动化, 1997, (4): 52 ~ 54

110 杜兆辉, 吴耀华. 快速原型技术医学应用研究. 机械工业自动化, 1997, (3): 18 ~ 23

111 邹清泽, 熔融沉积制造的工艺参数控制系统研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997

112 S. Scott Crump . Fused Deposition Modeling: Putting Rapid Back in Prototyping . In: The second International Conference on Rapid Prototyping. Dayton, Ohio, 1990, 358 ~ 361

113 James W. Comb, William R. Prideman. Control Prameters and Material Selection Criteria for Rapid Prototyping Systems. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium 1993. Austin: University of Texas at Austin, 1993, 96 ~ 93

114 James W. Comb. FDM Technology Process Improvements. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium 1994. Austin: University of Texas at Austin, 1994, 44 ~ 49

115 Yardimci, S. I. Guceri. Conceptual Framework for The Thermal Process Modeling of Fused Deposition. Rapid Prototyping Journal, 1996, (2): 29 ~ 31

116 M. A. Yardimci, S. I. Guceri, S. C. Danforth. A Phenomenological Model for Fused Deposition Processing. In: Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium 1995. Austin: University of Texas at Austin, 1995, 189 ~ 195

117 Liangwei Wu, Guodong Hong, Rendong Wu, et al. The Accuracy Analysis and Improvements in the transition of CAD models to MEM prototypes. In: Yongnian Yan, eds. Progress in Rapid Prototyping, Manufacturing and Rapid Tooling. Xi' an: Shannxi Science and Technology Press, 1998, 264 ~ 271

118 S. Scott Crump. Advances in materials and building platform for fused deposition of modeling. In: Proceeding of International Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing, Beijing, 2002, 19 ~ 20

119 William R. Priedeman. Thermoplastics for Fused Deposition Modeling. In: Proceedings of Rapid Product Development. Messe Stuttgart, 1996, 257 ~ 264

120 Liangwei Wu, Guodong Hong, Rendong Wu, et al. Material Issues in Melted Extrusion Manufacturing System. In: Yongnian Yan, eds. Progress in Rapid Prototyping, Manufacturing and Rapid Tooling. Xi' an: Shannxi Science and Technology Press, 1998, 159 ~ 164

121 赵松年, 张奇鹏. 机电一体化机械系统设计. 北京: 机械工业出版社, 1996

122 Yongnian Yan, Renji Zhang, Hong Gnodong, et al. Research on the bonding of materials paths in melted extrusion modeling. Mterials&Design, 2000, 21 (2): 93 ~ 99

123 T. R. Jackson, H Liu, N. M. Patrikalakis. Modeling and designing functionally graded material components for fabrication with local composition control. Materials and Design. 1999, 20 (2): 63 ~ 75



124 Yuhua Song, Yongnian Yan, Renji Zhang, et al. Boundary Model Between Casting and Matrix and Its Influence on the Dimensional Accuracy Analysis of Rapid Tooling. Proceeding of the institution of mechanical engineers Part B – Journal of Engineering Manufacture, 2002, 216 (8): 1123 ~ 1134
125 R. Anitha, S. Arunachalam, P. Radhakrishnan. Critical Parameters Influencing the quality of prototypes in Fused Deposition Modeling. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118 (2): 385 ~ 388.
126 颜永年，崔福斋，张人佶等．人工骨的快速成形制造．材料导报，2000，14（2）：11～13.
127 Hongyi Yang, Zhuo Xiong, Yongnian Yan. The Structure and Properties of Porous Scaffolds for Bone Tissue Engineering Fabricated via Low – Temperature Depositon. In: Proceedings of the Second International Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing 2002. Beijing: Journal of Tsinghua University Science and Technology, 2002, 537 ~ 542
128 Iwan Zein, Dietmar W. Hutmacher, Kim Cheng Tan, et al. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. Biomaterials, 2002, (23): 1169 ~ 1185
129 Merlin Warner, Brian Hsieh. Let's Cast a LOM Part: A Case Study of Laminated Object Manufacturing Machine. In: Proceeding of the Third International Conference on Rapid Prototyping. University of Dayton, Dayton. 1992, 287 ~ 294
130 Eiji Inui, Satoshi Morita, Kazuo Sugiyama, et al. SAHP – A Plain Paper 3D Printer/Plotter Process. In: Proceeding of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping. University of Dayton, Dayton. 1995, 15 ~ 26
131 Charles L. Thomas, Zetian Wang, Srinivas Kaza, et al. Shapemaker I: An Inexpensive Intruduction to Rapid Prototyping. In: Proceeding of the Sixth International Conference on Rapid Prototyping. University of Dayton, Dayton. 1996
132 Suh N. P. The Principles of Design. Cambridge: Oxford Univ. Press, 1990
133 雷仕湛．激光技术手册．北京：科学出版社，1992
134 朱企业．精密激光加工．北京：机械工业出版社，1990
135 浜崎正信著．实用激光加工．陈敬之译．北京：机械工业出版社，1992
136 闫禾，钟敏霖．高功率激光加工及其应用．天津：天津科学技术出版社，1992
137 Guo Haibin, Yan Yongnian. Application for laser power matching the scanning speed in time in M – RP&MS. 15th International Congress on Application of Lasers and Electro – Optics. Detroit, 1996
138 郭海滨，林峰，冯伟等．用于多功能 RP&M 系统的激光功率与扫描速度的实时匹配．中国首届先进制造技术会议论文集．北京，1996
139 Sung S. Pak, Gregory Nisnevich. Interlaminate Strength and Processing Efficiency Improvements in Laminated Object Manufacturing. In: Proceeding of the Sixth International Conference on Rapid Prototyping. University of Dayton, Dayton. 1996, 171 ~ 180.
140 郭永红．大型分层实体制造工艺研究：［博士学位论文］．北京：清华大学机械系，2001
141 唐果林．分层实体制造中的变形研究：［学士学位论文］．北京：清华大学机械系，1999
142 Joon Park, Michael J. Tari, Thomas Haln. Characterization of the Laminated Object Manufacturing (LOM) process. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6 (1): 36 ~ 49
143 Clement K. Y. Mak, David C. C. Lam, Matthew M. F. Yuen, et al. Deformation prediction of the laminated object modeling composite laminates. J. of Materials Processing Technology, 2000, (103): 261 ~ 266
144 H. W. Haslach Jr., M. G. Pecht, X. Wu. A viscoelastic model for variable humidity loading in creep. Mechanics Wood Paper Mater, 1990, (112): 1 ~ 7
145 Lin, F., Sun, W. Warping Analysis in Laminated Object Manufacturing Process. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2001, (123): 739 ~ 746
146 Fazil O. Sonmez, H. Thomas Hahn. Thermocmechanical analysis of the Laminated Object Manufacturing (LOM) Process. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4 (1): 26 ~ 36
147 高洪涛．SSM 工艺中零件温度场和应力场模拟：［学士学位论文］．北京：清华大学机械系，2000
148 J. de Boer, R. J. Visser. Time – resolved Determination of Volume Shrinkage and Refractive Index Change of Thin Polymer Films During Photoploymerization. Polymer, 1992, 33 (6): 1123 ~ 1126
149 刘凤岐，汤心颐．高分子物理．北京：高等教育出版社，1995
150 黄旗明．影响 LOM 型快速成形精度和效率的关键因素研究：［博士学位论文］．武汉：华中理工大学机械科学与工程学院，1997
151 徐丹．大中型 PCM 设备的研究与开发：［硕士学位论文］．北京：清华大学机械系，1999
152 王峰．基于并行控制原理与技术的大型快速成形系统的研究与实现：［博士学位论文］．北京：清华大学机械系，1999
153 颜永年，郭永红，张人佶等．预分割快速原型制造方法．中国发明专利，00132124.2，1999
154 魏大忠．压电驱动数字微滴喷射技术研究：［博士学位论文］．北京：清华大学机械系，2004
155 魏大忠，张人佶，吴任东等．压电驱动微滴喷射装置的设计．清华大学学报（自然科学版），2004，44（8）：1107～1110
156 周浩颖．压电式材料数字微滴喷射技术研究：［硕士学位论文］．北京：清华大学机械系，2003
157 刘丰，魏大忠，张人佶．快速成形中压电微滴喷射驱动元件的力－位移模型．第三届全国快速成型与快速制造学术会议论文集．昆明，2004，59～62
158 吴任东，魏大忠，周浩颖等．三维数字微滴喷射技术的发展现状．新技术新工艺，2004，(2)：35～38
159 杨大智．智能材料与智能系统．天津：天津大学出版社，2000
160 侯卫兵，冯冠平．打印机喷墨技术．清华大学学报（自然科学版），1997，37（11）：94～99
161 Lang Walter. Reflexions on the future of Microsystems. Sensors and Actuators, 1999, 72: 1 ~ 15
162 丁辛芳，刘岩海．微型泵的驱动技术．电子器件，2001，3（24）：87～92
163 曲志深．喷墨打印机原理．北京：清华大学出版社，1995
164 A. M. Gañán – Calvo, A. Barrero. A Novel Pneumatic Technique to Generate Steady Capillary Microjets, J. Aerosol Sci. 1994, 30 (1): 117 ~ 125
165 张付军．电控喷油嘴油量特性的实验研究．汽车工程，



1994，2：80～86

166 朱永刚，王兴甫．超声波喷嘴实验研究．推进技术，1997，18（6）：67～72

167 杨树兴．气动高速开关阀用电磁铁研究．机床与液压，1997，（6）：31～32

168 贾振元，杨兴，武丹等．超磁致伸缩执行器及其在流体控制元件中的应用，机床与液压，2000，2：3～4

169 张福学．现代压电学：下册．北京：科学出版社，2002

170 罗小兵，李志信，过增元．压电驱动合成喷的设计及分析．功能材料与器件学报，2001，2（7）：116～120

171 Blazdell P. F.，Evans J. R. G.，Edirisinghe M. J.，et al. Computer Aided Manufacturing of Ceramics using Multilayer Jet Printing. Journal of Materials Science Letters，1995，14（22）：1562～1565

172 E. Sachs . 3D Printing Surface Finish Improvements through On－line Control. Proc. of 5th Conf. on Rapid Prototyping. 1993，1～10

173 Fey，V. R.，E. I. Revin，I. M. Vertkin. Application of the Theory of Inventive Problem Solving to Design and Manufacturing Systems. Annals of the CIRP，1994，43（1）：107～110

174 Anne Stuart Kohnen. Drop－On－Demand Ink Jet Printing for Three Dimensional Printer Application [Master Thesis]. MIT，1995

175 程光明，杨志刚，曾平等．新型压电驱动机构．压电与声光，2000，22（2）：168～172

176 周桃生，吴静，邝安祥．压电陶瓷－金属复合体及其应用．压电与声光，1998，20（2）：28～33

177 Ming C. Leu，Wei Zhang. Research and Development in Rapid Prototyping and Tooling in the United States. In：Yan Yongnian ed. Proceedings of 1st Int. Conf. on RPM. Xi' an：Shanxi Science and Technology Press，1998，707～728

178 Zhang W，Leu MC，Ji ZM，et al. Rapid freezing prototyping with water. Materials and Design，1999，20（2－3）：139～145

179 Zhang，W.，Leu，M. C.，Sui，G. H. ，et al. An Experimental and Analytical Study of Ice Part Fabrication with Rapid Freezing Prototyping. In：David L. Bourell，Joseph J. Beaman，Richard H. Crawford，et al. eds. Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin：The University of Texas at Austin，1999，591～598

180 Chao Feng，Renji Zhang，Yongnian Yan，et al. Rapid Prototyping Technology of Low Temperature Ice Forming. In：The 8th International Conference on Rapid Prototyping，Japan，2000，190～194

181 冯超，任荣，颜永年等．基于水及溶液的凝固堆积快速成形方法及其装置．中国机械工程，2000，（增刊）：83～85

182 Yodice，A. Freeze Process Cuts Casting Costs. Advanced Materials and Processes，1999，155（4）：35～37

183 吴小路．基于快速成形冰模的陶瓷型精密铸造研究：[学士学位论文]．北京：清华大学机械系，1998

184 罗振坚．利用冰模原型浇铸金属铸件的工艺研究：[学士学位论文]．北京：清华大学机械系，1999

185 E. M. Ronald. Picoliter Solder Droplet Dispensing. In：Harris L. Marcus，Joseph J. Beaman，Joel W. Barlow，et al. eds. Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium，Austin，Texas：The University of Texas at Austin，1993，81～85

186 关亮．基于快速原型的快速制模技术的研究：[硕士学位论文]．北京：清华大学机械系，2000

187 冯超．低温冰型快速成形技术研究：[博士学位论文]．北京：清华大学机械系，2001

188 Yongnian Yan，Chao Feng，Rong Ren ，et al. Rapid Tooling based on ice prototype by using Investment Precision Cast. In：The proceedings of the 1st International Conference on Die & Mould Technology，Beijing：China Machine Press，2000，273～278

189 Wei Zhang，Ming C. Leu，Chao Feng，et al. Investment Casting with Ice Patterns Made by Rapid Freezing Prototyping. In：David L. Bourell，Joseph J. Beaman，Richard H. Crawford，et al. eds. Solid Freeform Fabrication Proceedings. Austin：The University of Texas at Austin，2000，66～72

190 佟天夫，陈冰，姜不居等．熔模铸造工艺．北京：机械工业出版社，1991

191 Behrokh Khoshnevis，Bahram Asiabampour，Mehdi Mojdeh，et al. SIS－A new SFF method based on powder sintering. Rapid Prototyping Journal，2003，9（1）：30～36

192 Bahram Asiabanpour，Kurt Palmer，Behrokh Khoshnevis，et al. An experimental study of surface quality and dimensional accuracy for selective inhibition of sintering. Rapid Prototyping Journal，2004，10（3）：181～192

193 颜永年，刁庆军，郭海滨等．多功能快速原型/零件制造系统—— M－RPMS的研究．见：海锦涛，张立斌，陆辛编．先进制造技术．北京：机械工业出版社，1996，913～920

194 颜永年，张人佶，郭海滨等．快速成型技术的功能集成研究．中国机械工程，1997，8（5）：13～15

195 Yongnian Yan，Renji Zhang，Qingping Lu，et al. Study on multifunctional rapid prototyping manufacturing system. Integrated Manufacturing Systems，1998，9（4）：236～241

196 Yongnian Yan，Guang Zeng，Renji Zhang，et al. Study on Multifunctional Rapid Prototyping Manufacturing System（M－RPMS）. ICMA' 97，Hong Kong，1997，111～116

197 颜永年，张晓萍，冯常学．机械电子工程．北京：化学工业出版社，1999

198 颜永年，齐海波．快速制造的内涵与应用．航空制造技术，2004，（5）：26～29

199 张人佶，颜永年，卢清萍等．基于快速原型的快速制造技术．见：云南省科技学术交流中心编．快速成型与快速制造．北京：原子能出版社，2004：6～11

200 杨伟东．基于砂粒复合裹覆的无模铸造工艺的研究与实现：[博士学位论文]．北京：清华大学，2003

201 颜永年，张人佶，单忠德等．快速模具技术的最新进展及其发展趋势．航空制造技术，2002（4）：17～21

202 徐国贤．直接金属沉积成形技术的软件及工艺研究：[硕士学位论文]．北京：清华大学机械系，2001

203 徐国贤，颜永年，郭戈等．直接金属沉积成形工艺的RP软件研究．新技术新工艺，2003，（2）：31～34

204 吴任东，王青岗，颜永年等．直接金属沉积成形工艺研．热加工工艺，2004，（1）：1～3

205 杨森，钟敏霖，张庆茂等．金属零件的激光直接快速制造．粉末冶金技术，2002，20（4）：234～238

206 张永忠，张萍芝，石力开等．激光直接堆积成形铜合金的组织及性能．金属热处理，2001，（6）：5～7

207 Murty YV，Robert FD. Technology Trends in Near Net Shape Manufacturing，Advanced Materials & Processes，1998，153（1）：47

208 Harris LM，David LB. Solid Freeform Fabrication Finds New



Application, Advanced Materials &Processes, 1993, 144 (3): 28

209 Lewis Gary K, Lyons Peter, et al. Direct laser metal deposition process fabricates near – net – shape components rapidly, Materials Technology, 1995, 10 (3): 51 ~ 54

210 Gary K. Lewis, Eric Schlienger. Practical Considerations and Capabilities for Laser Assisted Direct Metal Deposition. Materials and Design, 2000, 21 (2): 417 ~ 423

211 M. L. Griffith, M. T. Ensz, D. L. Greene, et al. Solid Freeform Fabrication Using the Wirefeed Process. In: Solid Freeform Fabrication Proceedings, Texas, 1999, 529 ~ 536

212 郭庚辰主编. 液相烧结粉末冶金材料. 北京: 化学工业出版社, 2003

213 Mazumder J, Choi J, Nagarathnam K, et al. Direct metal deposition of H13 tool steel for 3 – D components. Journal of Materials, 1997, 49 (5): 55 ~ 60

214 J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi, et al. Closed loop direct metal deposition: art to part. Optics and Lasers in Engineering, 2000, (34): 397 ~ 414

215 Francisco P. Jeantette, David M. keicher, Joseph A. Romero, et al. Method and System for Producing Complex – shape Objects. U. S patent, 6046426, 2000

216 Kobryn, P. A., Semiatin, S. L. The Laser Additive Manufacture of Ti – 6Al – 4V. JOM, 2001, 53 (9): 40 – 42

217 Arcella, F. G., Froes, F. H. Producing Titanium Aerospace Components from Powder Using Laser Forming, JOM, 2000, 52 (5): 28 ~ 30

218 Andrew J. Pinkerton, Lin Li. The Effect of Laser Pulse Width on Multiple – layer 316L Steel Clad Microstructure and Surface Finish. Applied Surface Science, 2003, (208 – 209): 411 ~ 416

219 J. Laeng, J. G. Sterwart, F. W. Liou. Laser Metal Forming Processes for Rapid Prototyping – A Review. Int. J. Prod. Res., 2000, 38 (16): 3973 ~ 3996

220 X. Wu, J. Mei. Near Net Shape Manufacturing of Components Using Direct Laser Fabrication Technology. Journal of Materials Processing Technology, 2003, (135): 266 ~ 270

221 Melissa Orme, Robert F. Smith. Enhanced Aluminum Properties by Means of Precise Droplet Deposition. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, (122): 484 ~ 493

222 Suman Das, Joseph J. Beaman, et al. Direct laser freeform fabrication of high performance metal components. Papid Prototyping Journal, 1998, 4 (3): 112 ~ 117

223 Gayle Link. Layered manufacturing of laser deposited carbon steels: [Ph Thesis]. Standford: Stanford University, 1999

224 易树平, 熊世权, 张津等. 金属零件分层快速制造关键技术研究. 机械工程学报, 2002, 38 (12): 111 ~ 115

225 Katsuhiro Maekawa. Three – Dimensional Powder Fabrication by Laser Sintering. In: Yongnian Yan ed. Progress in rapid prototyping and rapid manufacturing, 2002, 304 ~ 313

226 齐海波, 林峰, 颜永年等. 电子束在快速制造领域的应用. 新技术新工艺, 2004, (11): 54 ~ 56

227 齐海波, 林峰, 闫占功等. 电子束熔化金属粉末材料的粉末状态分析. 清华大学学报, 2005, 45 (8): 1012 – 1015

228 齐海波, 颜永年, 林峰等. 电子束快速制造技术制备 SiCp/Al 复合材料. 材料工程, 2005, (11): 61 – 64

229 唐敦乙, 林书栓, 刘志敏. 强流荷电粒子束技术与应用. 北京: 电子工业出版社, 1995

230 刘江龙, 邹至荣, 苏宝嫆. 高能束热处理. 北京: 机械工业出版社, 1997

231 宋宜梅, 李少林, 钟庆华. 电子束技术在工业领域的应用. 广西机械, 2003, (1): 17 ~ 21

232 宋仁国, 陈光南, 张坤. 激光和电子束表面强化技术的发展及其应用. 物理, 2000, 29 (7): 411 ~ 415

233 关桥. 高能束流加工技术: 先进制造技术发展的重要方向. 航空工艺技术, 1995, (A01): 6 ~ 10, 15

234 林达. 电子束加工与激光加工的互补性. 先进制造与材料应用技术, 1998, (1): 7 ~ 12

235 王之康, 高永华, 徐宾. 真空电子束焊接设备及工艺. 北京: 原子能出版社, 1990

236 (德) M. Von 奥尔曼. 激光束与材料相互作用的物理原理及应用, 漆海兵等译. 北京: 科学出版社, 1994

237 郭光耀, 方军, 韩瑞清. 电子束扫描控制系统. 焊接学报, 2003, 24 (1): 91 ~ 93

238 李成功, 傅恒志, 于翘. 航空航天材料. 北京: 国防工业出版社, 2002

239 方一兵, 尹明. 电子束扫描旋转和正交的自动调节. 山东轻工业学院学报, 1999, 13 (4): 30 ~ 32

240 Cormier D, Harrysson A, West H. Characterization of H13 steel produced via electron beam melting. Rapid Prototyping Journal, 2004, 10 (1): 35 ~ 41

241 Nobuyuki Abe, Junji Morimoto, Michio Tomie, et al. Formation of WC – Co Layers by an Electron Beam Cladding Method and Evaluation of the Layer Properties. Vacuum, 2000, (59): 373 ~ 380

242 John Edward Matz. Carbide Formation in a Nickel – based Super alloy During Electron Beam Solid Freefrom Fabrication [PhD Dissertation]. MIT, 1999

243 Junji Morimoto, Nobuyuki Abe, Fumiaki Kuriyama, et al. Formation of a Cr_3C_2/Ni – Cr alloy layer by an electron beam cladding method and evaluation of the layer properties. Vacuum, 2001, (62): 203 ~ 210

244 陆厚根. 粉体工程概论. 上海: 同济大学出版社, 1993

245 Ming Xue, Yongnian Yan, Renji Zhang. Study on Rapid Prototyping Technology of Chemical Deposition. In: Proceedings of the Second International Conference on Rapid Prototyping & Manufacturing, Beijing, 2002, 267 ~ 271

246 谢高阳, 申泮文, 徐绍文等. 无机化学丛书: 第 9 卷, 锰分族 铁系 铂系. 北京: 科学出版社, 1996

247 Ashley S. Rapid Prototyping Industry’s Growing Pains. Mechanical Engineering, 1998, 120 (7): 64 – 68

248 Chun Jun – Hoon, Christian H Passow. Production of Charged Uniformly Sized Metal Droplets. United States Patent, 5266098, 1998

249 Jakubenas K J, Sanchez J M, Marcus H L. Multiple Material Solid Free – Form Fabrication by Selective Area Laser Deposition. Materials and Design, 1998, 19 (1 – 2): 11 ~ 18

250 Zongyan He, Jack G. Zhou, Ampere A. Tseng. Feasibility Study of Chemical Liquid Deposition Based Solid Freeform Fabrication. Materials and Design, 2000, 21 (2): 83 ~ 92

251 Jack G. Zhou, Zongyan He, Jian Guo. Fractal Growth Modeling of Electrochemical Deposition in Solid Freeform Fabrication. In: The 10th Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Austin: University of Texas Press, 1999

252 Birmingham B R, Marcus H L. Solid Freeform Fabrication of Silicon Nitride Shapes by Selective Laser Reaction Sintering (SLRS). In: Marcus H L et al., ed. The 6th Solid Freeform

Fabrication Symposium Proceedings. Austin: University of Texas Press, 1995, 389 ~ 396

253 Lehmann O, Stuke M. Three - dimensional Laser Direct Writing of Electrically Conducting and Isolating Microstructures. Materials Letters, 1994, (21): 131 ~ 136

254 Maxwell J, Pegna J, Hill E. Gas - phase Laser - induced Pyrolysis of Tapered Microstructures. In: Marcus H L et al., editor. The 6th Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Austin: University of Texas Press, 1995, 143 ~ 150

255 Scott N. Bondi, Ryan W. Johnson, Tarek Elkhatib, et al. Multi - material and Advanced Geometry Deposition via Laser Chemical Vapor Deposition. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9 (1): 14 ~ 18

256 Jiang Hong. Electron Beam - induced Organometallic Chemical Vapor Deposition for Nanostructure Fabrication [PhD Dissertation]. Lincoln: The University of Nebraska - Lincoln, 2000

257 Kordas K, bali K, Leppavuori S. Laser Direct Writing of Palladium on Polyimide Surface from Solution. Apply Surface Science, 1999, (152): 149 ~ 155

258 王旭红，郁祖湛，赵国庆等．环氧树脂上激光诱导局域化学沉铜．复旦大学学报，1994，33 (1)：7 ~ 10

259 王建，郁祖湛，郁宁．P型硅片上激光诱导局域化学沉镍．高等学校化学学报，1996，17 (4)：626 ~ 629

260 黄妙良，林建明．非金属材料表面激光诱导化学局域镀敷金属（铜、镍）的研究．激光与光电子学进展，1998，(385)：10 ~ 14

261 谢湘华，张谊华，方尔梯等．激光诱导醋酸铜乙醇溶液反应直写金属铜线．应用激光，1996，16 (6)：252 ~ 254

262 刘立兵，赵毅，李明辉．激光诱导普通玻璃表面局域液相化学沉积铜的研究．激光杂志，2002，23 (3)：51 ~ 53

263 刘立兵，赵毅，李明辉等．基于RP技术的激光诱导选择性化学沉积微细加工技术的研究．机械工程学报，2003，39 (1)：137 ~ 142

264 Kordas K, Bekesi J, Vajtai R, et al. Laser - assisted Metal Deposition from Liquid - phase precursors on polymers. Applied Surface Science, 2001, (172): 178 ~ 189

265 王建，郁祖湛．激光镀技术的研究动态．电镀与精饰，1999，21 (3)：1 ~ 3

266 郭海生，金孝红，云乃彰．选择性电沉积快速制造法．电加工与模具，2000，(5)：41 ~ 43

267 吴安德，王帮峰，吕益艳等．一种新的快速制造技术——选择性电铸．中国机械工程，2000，11 (增刊)：81 ~ 82

268 王帮峰，黄因慧，余承业．选择性射流电铸技术初探．机械科学与技术，2002，21 (2)：263 ~ 265

269 赵阳培，黄因慧，吴安德．射流电铸快速成型技术研究．南京理工大学学报，2003，27 (4)：359 ~ 362

270 单忠德．基于快速原型的金属模具制造工艺研究：[博士学位论文]．北京：清华大学机械系，2002

271 谷诤巍．基于快速原型的快速金属模具喷涂制造工艺研究：[博士后研究报告]．北京：清华大学机械系，2004

272 徐达．基于RP的无焙烧陶瓷型精密铸造：[博士后出站报告]．北京：清华大学机械系，1998

273 亓峰．基于快速原型的喷涂法快速模具制造技术：[硕士学位论文]．北京：清华大学机械系，2001

274 梁剑江．基于快速成形的石膏型快速模具制造技术：[硕士学位论文]．北京：清华大学机械系，2001

275 徐达，宋玉华，颜永年等．基于快速成形技术的汽车覆盖件金属模具制造，清华大学学报，2000，40 (5)：1 ~ 4

276 Z Shan, Y Yan, R Zhang, et al. Rapid tooling using plasma spraying and rapid prototyping. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C, 2003, 217 (1): 97 ~ 104

277 Z. Shan, Y. Yan, R. Zhang, et al. Rapid manufacture of metal tooling by rapid prototyping. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21 (7): 469 ~ 475

278 Song YH, Yan YN, Zhang RJ, et al. Manufacture of the die of an automobile deck part based on rapid prototyping and rapid tooling technology. Journal of materials processing technology, 2002, 120 (1 - 3): 237 ~ 242

279 Yongnian Yan, Renji Zhang, Qingping Lu, et al. Recent Development and Trend of Rapid Tooling Technology. In: The Proceedings of the 1st International Conference on Die & Mould Technology. Beijing: China Machine Press, 2000, 37 ~ 51

280 Zhongde Shan, Yongnian Yan, Renji Zhang. Study on Rapid Tool of Transferred Coating Precision Forming Based on Rapid Prototyping, In: The proceedings of the 1st International Conference on Die & Mould Technology. Beijing: China Machine Press, 2000, 297 ~ 300

281 Zhongde Shan, Yongnian Yan, Renji Zhang. Techniques for Hard Tooling using Rapid Prototyping. In: The proceedings of the 1st International Conference on Die & Mould Technology. Beijing: China Machine Press, 2000, 263 ~ 278

282 Shan Zhongde, Yan Yongnian, Zhang Renji, et al. Rapid mould from plasma spraying & rapid prototyping. In: Dongming Guo Eds. Proceedings of the 5th international conference on frontiers of design and manufacturing (ICFDM 2002). Dalian, China, 2002. 344 ~ 348

283 单忠德，颜永年，范金辉等．基于快速原型技术的非占位涂层快速精确成形技术研究．中国铸造装备与技术，2000，(4)：10 ~ 12

284 谷诤巍，袁达，张人佶等．基于RP原型的电弧喷涂快速模具制造技术研究．电加工与模具，2003，(1)：50 ~ 52

285 单忠德，梁剑江，袁达等．基于快速原型的石膏型快速模具制造技术研究．模具工艺，2001，(10)：43 ~ 46

286 Millan K. Yeung. Rapid tooling - a step change in mould manufacturing. In: Pierre Boulange ed. Rapid Product Development Technologies. Washington: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1997, 176 ~ 186

287 D. King, T. Tansey. Rapid tooling: selective laser sintering injection tooling. Journal of Materials Processing Technology, 2003, (132): 42 ~ 48

288 张海鸥，徐继鹏．金属零件和模具的快速制造技术发展动向．航空制造技术，2000，(4)：22 ~ 24

289 张海鸥．金属模具快速制造技术．电加工与模具，2002，(2)：6 ~ 8

290 Haiou Zhang, Guilan Wang, Yunhua Luo, et al. Rapid hard tooling by plasma spraying for injection molding and sheet metal forming. Thin solid films, 2001, (390): 7 ~ 12

291 A. Rosochowski, A. Matuszak. Rapid tooling: the state of the art. Journal of Materials Processing Technology, 2000, (106): 191 ~ 198

292 C. K. Chua, K. H. Hong, S. L. Ho. Rapid tooling technology Part 1: A comparative study. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999,



(15): 604～608

293 H. Muller, J. Sladojevic. Rapid tooling approaches for small lot production of sheet－metal parts. Journal of Materials Processing Technology, 2001, (115): 97～103

294 M. W. Khaing, J. Y. H. Fah, L. Lu. Direct metal sintering for rapid tooling: Process and characteristics of EOS parts. Journal of Materials Processing Technology, 2001, (113): 269～272

295 A. Devasenapathi, H. W. Ng, S. C. M., et al. Forming near net shape free－standing components by plasma spraying. Materials Letters, 2002, (57): 882～886

296 H. O. Zhang, T. Nakagawa. The manufacturing of an injection molding tool with a precision natural leather pattern surface by the plasma spraying of stainless steel. Journal of Materials Processing Technology, 1997, (63): 899～901

297 蔡挺. 热喷涂技术的现状和应用. 广东有色金属学报, 1999, (5): 59～63

298 薛家祥, 黄石生. 等离子喷涂技术的现状与展望. 电焊机, 1994, (3): 8～11

299 邓琦林, 胡德金. 等离子喷涂法快速制模技术的实验基础研究. 电加工与模具, 2003, (2): 36～39

300 Yanxiang Chen, Guilan Wang, Haiou Zhang. Numerical simulation of coating growth and pore formation in rapid plasma spray tooling. Thin solid films, 2001, (390): 13～19

301 郑学斌, 黄民辉, 黄静琦等. 喷涂距离和喷涂功率对羟基磷灰石涂层的影响. 无机材料学报, 1999, (10): 783～788

302 徐文骥. 等离子熔射成形法制造零件技术的基础研究: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2000

303 李东飞, 邵贝羚, 刘安生等. 金属低压等离子喷涂界面的结合性能及微观结构. 稀有金属, 2001, (7): 241～246

304 张春明, 左敦稳, 王珉. 等离子喷涂种粉末熔化过程数值分析. 南京航空航天大学学报, 1998, (12): 713～717

305 Nobuaki Sakoda, Moritaka Hida, Yoshito Takemoto, et al. Influence of atomization gas on coating properties under Ti arc spraying. Materials Science & Engineering, 2003, 342: 264～269

306 V. J. P. Lim, K. A. Khor, P. Cheang. Hydroxyapatite Zirconia composite coatings via the plasma spraying process. Journal of Materials Processing Technology, 1999, (89): 491～496

307 马壮. 等离子喷涂沉积率对梯度涂层结合强度影响研究. 材料工程, 2001, (5): 34～36

308 邓琦林. 等离子喷涂快速成型技术研究. 航空精密制造技术, 1999, (5): 11～15

309 王伊卿, 卢凤兰, 卢秉恒. 电铸与电弧喷涂相结合制造EDM电极. 电加工与模具, 2001, (4): 41～43

310 Prasad K. D, V. Yarlagadda, Ismet P. Development of rapid tooling for sheet metal drawing using nickel electroforming and stereolithography process. Journal of Materials Processing Technology, 2001, (111): 286～294

311 田保红, 徐滨士, 马世宁等. 高速电弧喷涂不锈钢涂层的旋转回归试验研究. 焊接学报, 2000, (6): 77～79

312 王伊卿, 朱东波, 卢秉恒. 电弧喷涂制造汽车覆盖件模具. 模具工业, 2001, (9): 41～45

313 韩昌仁, 周铁涛, 王微微等. 石膏型简易制模工艺的研究. 特种铸造及有色合金, 2000, (4): 27～29

314 王伊卿, 赵文珍, 唐一平等. 电弧喷涂模具材料性能研究. 中国机械工程, 2000, (10): 1112～1115

315 Raymond E Chalmers. Rapid tooling technology from Ford country. Manufacturing Engineering, 2001, 11 (5): 36～41

316 杜昭辉. CAD模型直接驱动铸型制造的研究与开发: [博士学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 1997

317 徐丹. 无模铸型制造工艺和设备的研究与开发: [博士学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 2002

318 杨伟东. 基于砂粒复合裹覆的无模铸造工艺的研究与实现: [博士学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 2003

319 戴志煌. 大型无木模铸型制造工艺的研究与开发: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 2000

320 Yang Weidong, Yan Yongnian, Xu Dan, et al. Factors Affecting Forming Precision in Patternless Casting Manufacturing. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16 (2): 209～212

321 杨伟东, 颜永年, 徐丹等. 无模铸造工艺中凝聚单元体形态的研究. 中国机械工程, 2003, 14 (5): 377～379

322 颜永年, 杨伟东, 张人佶等. 无木模砂型制造原理和方法. 中国专利, 03157060.7, 2003

323 徐丹, 颜永年, 杨伟东. PCM喷射方式的研究. 中国机械工程, 2002, 13 (23): 2001～2003

324 隋光华. 选择性激光烧结工艺及材料研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 1998

325 张人佶, 隋光华, 郭海滨等. 用于选择性激光烧结(SLS)的粉末材料的制备. 见: 第一届中国RPM学术及技术展示会论文集, 北京, 1995, 139～142

326 张人佶, 单忠德, 隋光华等. 粉末材料的SLS工艺激光扫描过程研究. 应用激光, 1999, 19 (5): 299～301

327 Renji Zhang, Guanghua Sui, Guang Zeng, et al. Design of SLS (Selective Laser Sintering) in MRPMS (Multi－functional Rapid Prototyping Manufacturing System). In: J. Yoo, M. J. Cima, S. Khanuja, et al. eds. Proceedings of the International Conference on Manufacturing Automation. Hong kong: The University of HongKong, 1997, 117～121

328 Grenlich Michael, Greul Matthias, Pintat Theo. Fast, Functional Prototypes via Multi－phase Jet Solidification. Rapid prototyping journal, 1995, 1 (1): 20～25

329 E. M. Sachs, J. S. Haggerty, M. J. Cima, et al. Three－Dimensinal Printing Techniques. US Patent, 5204055. 1993

330 S. Michaels, E. M. Sachs, M. J. Cima, et al. Metal Parts Generation by Three－Dimensional Printing. In: Harris L. Marcus, Joseph J. Beaman, Joel W. Barlow, et al. eds. Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 1992, 244～250

331 夏春林, 丁凡, 陈大军等. 超磁致伸缩材料在流体控制元件中的应用研究展望. 液压气动与密封, 1997, (2): 2～4

332 胡才彬, 魏兆连, 徐福先等. 醇基涂料悬浮性的探索. 铸造技术, 1995 (4): 6～17

333 肖柯则. 自硬树脂砂所用涂料. 铸造技术, 1995, (4): 32～33

334 黄天佑主编. 铸造手册－造型材料. 北京: 机械工艺出版社, 2002

335 张启勋, 汪宝堂. 树脂膜厚度与树脂砂强度的关系. 铸造技术, 1998, (2): 44～45

336 郑水林编. 粉体表面改性. 北京: 中国建材工业出版社, 1995
337 CAV. GALANTE GABRIELE 著. 自硬砂之理论与应用. 于震宗, 缪良译. 北京: 机械工业出版社, 2000
338 谢明师主编. 呋喃树脂自硬砂实用技术. 北京: 机械工业出版社, 1995
339 杨晶, 刘云. PEPSET 和呋喃树脂自硬砂性能对比研究. 华北工学院学报, 1999, (4): 342~344
340 李杰. 偶联剂-硅烷在树脂砂铸造中的应用. 特种铸造及有色金属, 1998, (3): 12~15
341 王重生. 姚书蓉. 铸造水基自剥实型涂料的研究与应用. 特种铸造及有色冶金, 1995, (5): 15~18
342 孙淑婷, 王建钢. 磺酸固化剂酸度对型砂工艺性能的影响. 铸造, 1997, (10): 34~36
343 杨晶, 赵丽萍, 程军. PEPSET 树脂砂性能及其它影响因素的研究. 兵工学报, 2000, 21 (1): 35~37
344 中国标准出版社 第三编辑室编. 铸造标准汇编: 铸造基础, 铸造材料, 铸造工艺. 北京: 中国标准出版社, 1997
345 C. L. Thomas, Z. Wang, S. Kaza, et al. An Inexpensive Introduction to Rapid Prototyping. In: Richard P. Chartoff, Allan J. Lightman eds. Proceedings of The 6th International Conference on Rapid Prototyping. Dayton, Ohio: The University of Dayton, 1995, 357~362
346 Paul F. Jacobs. Stereolithography and other RP&M Technologies. New York: ASME Press, 1996
347 Mukesh K. Agarwala, David L. Bourell, Benny Wu, et al. An Evaluation of the Mechanical Behavior of Bronze-Ni Composites Produced by Selective Laser Sintering. In: Harris L. Marcus, Joseph J. Beaman, Joel W. Barlow, et al. eds. Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 1993, 193~203
348 J. Robert. Structural Ceramic Component By 3D Printing. In: Harris L. Marcus, Joseph J. Beaman, Joel W. Barlow, et al. eds. Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 1993, 40~50
349 黄伯云主编. 粉末冶金标准手册. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000
350 赵剑锋, 张建华, 余承业等. 激光烧结铸造型壳强度试验分析. 南京航空航天大学学报, 2001, 33 (1): 41~44
351 Karl R. Denton, Paul F. Jacobs. QuickCast™ & Rapid Tooling: A Case History at Ford Motor Company. In: Proceedings of the third European conference of rapid prototyping & manufacturing. Nottingham: University of Nottingham, 1994, 154~173
352 Paul F. Jacobs. QUICKCAST™ 1.1 &RAPID TOOLING. In: Richard P. Chartoff, Allan J. Lightman eds. Proceedings of The 6th International Conference on Rapid Prototyping. Dayton, Ohio: The University of Dayton, 1995, 237~247
353 马天, 邢建东, 方亮等. 采用快速原型树脂模铸造精密模具. 西安交通大学学报, 2001, 35 (3): 292~297
354 陈立峰. 材料微粒的激光引导输运过程研究: [博士学位论文]. 北京: 清华大学机械系, 2004
355 Lifeng Chen, Yongnian Yan, Renji Zhang. Effects of the Convection in Laser Guided Transportation. Journal of Mechanical Engineering Science, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C. 2004, 218 (7): 775~782
356 Lifeng Chen, Yongnian Yan, Renji Zhang. Analysis of the Depositing Forming Process Based on Laser-Guided Direct Writing. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Rapid Prototyping Manufacturing, Beijing ' 2002, Yongnian Yan ed. August 19-20, Beijing, 277~282
357 陈立峰, 张人佶. 基于光压原理的微堆积制造技术. 物理, 2003, 32 (12): 816~819
358 陈立峰, 颜永年, 张人佶. 基于激光引导的材料微粒堆积成形方法. 见: 第三届全国快速成型与快速制造学术会议论文集. 昆明, 2004, 3: 27~30
359 Douglas B. Material processing: The Power of Direct Writing. Science, 2000, 289 (5481): 879~811
360 Chrisey D, Piqué A, Fitz-Gerald J, et al. New approach to laser direct writing active and passive mesoscopic circuit elements. Applied Surface Science. 2000, 154-155: 593~600
361 Odde D, Renn M. Laser-guided direct writing for applications in biotechnology. Trends in Biotechnology, 1999, 17 (10): 385~389
362 Lowe C. Nanobiotechnology: the fabrication and applications of chemical and biological nanostructures. Current Opinion in Structural Biology, 2000, 10 (4): 428~434
363 Evans J. Direct ink jet printing of ceramics: experiment in technology. British Ceramic Transactions, 2001, 100 (3): 124~128
364 Mott M, Evans J. Zirconia/alumina functionally graded material made by ceramic ink jet printing. Materials Science and Engineering, 1999, (A271): 344~352
365 Thomas A. Witten. Insights from soft condensed matter. Reviews of Modem Physics, 1999, 71 (2): 367~373
366 Quake S, Scherer A. From Micro- to Nanofabrication with Soft Materials. Science, 2000, (290): 1536~1540
367 Ashkin A, Schuetze K, Dziedzic JM, et al. Force generation of organelle transport measured in vivo by an infrared laser trap. Nature, 1990, 348: 346~348
368 Block SM, Goldstein LSB, Schnapp BJ. Bead movement by single kinesin molecules studied with optical tweezers. Nature, 1990, (348): 348~352
369 Chu S. Laser manipulation of atoms and particles. Science, 1991, (253): 861~866
370 Svoboda K, Schmidt CF, Schnapp BJ, et al. Direct Observation of kinesin stepping by optical trapping interferometry. Nature, 1993, (365): 721~727
371 Misawa H, Sasaki K. Koshioka M, et al. Multi-beam laser manipulation and fixation of microparticles. Applied Physics Letters, 1992, (60): 310~312
372 Holmlin R, Schiavoni M, Chen C, et al. Light-Driven Microfabrication: Assembly of Multicomponent, Three-Dimensional Structures by Using Optical Tweezers. Angewandte Chemie International Edition, 2000, 39 (19): 3503~3506
373 Svoboda K., Block S. M. Biological applications of optical forces. Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure, 1994, (23): 247~285
374 Ashkin A. History of Optical Trapping and Manipulation of Small-Neutral Particle, Atoms, and Molecules. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6 (6): 841~856
375 蔡惟泉. 介质微粒的光捕限、光悬浮和光操纵. 物理学进展, 1997, 17 (1): 64~81
376 李银妹. 光镊原理、技术和应用. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996



377 赵理曾，秦勇，聂玉昕．光学悬浮及其应用．物理，1995，24（6）：331～335

378 周志康．激光微束与光钳系统．激光生物学报，1997，6（3）：1175

379 尚鹤岭，李迎军，王瑞丽等．激光微束操纵电介小球的实验研究．物理实验，2000，20（10）：16～19

380 姚新程，李兆霖，程丙英等．双层介质球体所受光作用力的分析与计算．光学学报，2000，20（10）：1305～1310

381 孟祥旺，李岩，张书练等．单光刀与单光镊激光微束系统．清华大学学报（自然科学版），2002，42（8）：1064～1067

382 Renn M., Pastel R., Lewandowski H. Laser guidance and trapping of mesoscale particles in hollow－core optical fibers. Physical Review Letters, 1999, 82（7）：1574～1577

383 Renn M., Pastel R. Particle manipulation and surface patterning by laser guidance. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1998, 16（6）：3859～3863

384 Odde D., Renn M. Laser－guided direct writing of living cells. Biotechnology and Bioengineering, 2000, 67（3）：312～318

385 Gao B., Fass J., Renn M, et al. Nano－ and microscale manipulation of biological particles by laser－guided direct writing. SPIE Proceedings, 2002, 245～250

386 Xu J., Grant S., Pastel R. Laser－Guided Direct Writing: A Novel Method to Deposit Biomolecules for Biosensors Arrays. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2003, 50（1）：126～128

387 Nahmias Y., Odde D. Analysis of Radiation Forces in Laser Trapping and Laser－Guided Direct Writing Applications. IEEE Journal of Quantum Electronics. 2002, 38（2）：131～141

388 吕百达．激光光学：激光束的传输变换和光束质量控制．成都：四川大学出版社，1992

389 吴成明，吴振森．离轴球形粒子对高斯波束的散射．电波科学学报，1995，10（4）：18～24

390 黄旭涛，严密．功能梯度材料：回顾与展望．材料科学与工程，1997，15（4）：35～38

391 Xiong Z, Yan Yongnian, Zhang Renji et al. Fabrication of porous poly（L－lactic acid）scafford for bone tissue engineering via precise extrusion. Scripta Materialia 45（7），2001，10：773～779

392 熊卓，颜永年，陈立峰等．骨组织工程细胞载体框架的两种快速成形新工艺．中国机械工程，2001，05

393 Xiong Z, Yan Yongnian, Wang, SG, et al. Fabriction of porous scaffolds for bone tissue engineering via low－temperature deposition. Scripta Materialia 46（11），2002，7：771～776

394 熊卓，颜永年，张人佶等．组织工程载体支架的无加热沉积制造．材料导报，2002，16（6）：59～61

395 郑卫国，颜永年，熊卓．复合材料梯度结构组织工程支架建模方法．材料导报，2002，16（11）：58～61

396 郑卫国，颜永年，周赫赫等．快速成形技术在临床外科手术中的潜在应用．清华大学学报，2002，42（8）：1038～1041

397 费小琛，颜永年，熊卓．骨组织工程支架的制造．材料导报，2002，16（9）：63～68

398 陈立峰，颜永年．功能结构器件的离散－堆积制造方法．中国机械工程，2003，14（1）：82～84

399 熊卓，颜永年，张超等．PLLA/TCP复合骨组织载体框架的低温挤出成形．清华大学学报（自然科学版），2003，43（5）：593～596

400 Yan Y., Wu R., Zhang R., et al. Biomaterial forming research using RP technology. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9（3）：142～149

401 Yan Y., Xiong Z., Hu Y., et al. Layered manufacturing of tissue engineering scaffolds via multi－nozzle deposition. Materials Letters, 2003, 57（18）：2623～2628

402 吴任东，张人佶，颜永年等．低温冰型在骨组织支架成形中的应用．低温工程，2003，（5）：26～30

403 费小琛，颜永年，熊卓等．骨组织工程PLGA/TCP复合材料的性能研究．材料导报，2003，17（12）：77～79

404 Yan Y., Wang X., Lin F., et al. Preparation and Evaluation of a Hydroxyapatite/Collagen/Chitosan Scaffold as Potential Bone Repair Materials. Sydney Austalia: 7th World Biomaterials Congress, 2004, 5

405 刘海霞，颜永年．组织器官的修复与重建，科学技术与工程，2005，5（2）

406 马兴，胡蕴玉，颜永年等．RP技术制备PDLLA/TCP人工骨载体与LD－PTH成骨效应相容性的体外实验．第四军医大学学报，2004，12

407 杨洪义，颜永年，熊卓等．胶原基组织工程支架对成纤维生长因子的控制释放与组织再生功能（英文）．中国临床康复，2004，11

408 费小琛，颜永年，熊卓等．骨组织工程PDLLA/TCP，复合材料的性能研究．材料导报，2003，12

409 刘海霞，颜永年，刘丰等．一种基于快速成形技术的细胞－材料三维受控组装工艺．中国科协第二届优秀博士生学术年会，苏州，中国科协第二届优秀博士生学术年会论文集，2004，10

410 熊卓．骨组织工程支架的低温沉积制造及应用基础研究：［博士学位论文］．北京：清华大学机械系，2002

411 杨洪义．生物制造及其在器官再造中的应用．［博士后出站报告］．北京：清华大学机械系，2003

412 顾汉卿，徐国风．生物医学材料学．天津：天津科技翻译出版公司，1993

413 师昌绪．材料科学技术百科全书．北京：中国大百科全书出版社，1995，8

414 崔福斋，冯庆龄．生物材料学．北京：科学出版社，1996

415 沈敦瑜，郭顺勤．生物无机化学．成都：成都科技大学出版社，1993

416 莫之民，齐宝森，陈方生．材料科学与工程基础．上海：上海交通大学出版社，1997

417 何炳林，马建标．生物材料的国际发展趋势及我国应采取的对策．材料导报，1992，3

418 陈小明，李世普．骨植入材料的表面特性与骨性结合．武汉工业大学学报，1995，17（4）：132～134

419 陈德敏．羟基磷灰石生物陶瓷合成及其生物学性能评价．中华口腔医学杂志．1991，26（5）：294～296

420 高法章．齿科陶瓷的进展．口腔材料器械杂志．1995，4（3）：122～125

421 黄维垣，闻建勋．高技术有机高分子材料进展．北京：化学工业出版社，1994

422 王国建，王公善．功能高分子．上海：同济大学出版社，1996

423 李荣久．陶瓷－金属复合材料．北京：冶金工业出版社，1995

424 张凤河，孙永清，孙涌泉．羟基磷灰石人工骨复合材料

的研究进展．山东生物医学工程，1995，14（1）：59～64
425 黄楠，杨苹，冷永祥．生物材料表面工程进展．中国科学基金，1999，13（2）：69
426 唐颂超．高分子材料成型加工．中国轻工业出版社，2000
427 张宏泉，阎玉华，李世普．生物医用复合材料的研究进展及趋势．北京生物医学工程，2000，19（1）：55～59
428 E. P. Paschalis, Q. Zhao, B. E. Tucker, et al. Degradation potential of plasma sprayer hydroxyapatite coated titanium implants. J. Biomed. Mater. Res. 1995,（29）：1499～1505
429 R. Z. LeGeros. Biodegradation and Bioresorption of Calcium ceramics. Clinical Materials, 1993,（14）：65～88
430 L. L. Hench. Bioactive glass and tissue regeneration. Bioceramics, 1996, 9：3～6
431 T. Nakamura. Bioceramics on Orthopedic surgery. Bioceramics, 1996,（9）：31～36
432 Dominic Walsh, Tsutomu Furuzono, Junzo Tanaka. Preparation of porous composite implant materials by in situ polymerization of porous apatite containing – caprolactone or methyl methacrylate. Biomaterials, 2001, 22：1205～1212
433 S. Ramakrishna, J. Mayer, E. Wintermental, et al. Biomedical Application of Polymer – composite Materials：a Review. Composites Science and Technology2001, 61：1189～1224
434 Teraoka, T. Nonami, Y. Doi, et al. Hydroxyapatite implantation on the surface of pure titanium for orthopedic implants. Materials Science and Engineering, 2000, C 13：105～107
435 Yasuhiko Tabata. The importance of drug delivery systems in tissue engineering. Research focus, 2000, 1（3）：80～89
436 Ingbe, D. Mechanochemical switching between growth and differentiation by extracellular matrix. In：Lanza R., Langer R., Chick W., eds. Principles of tissue engineering. USA：R. G. Landes Company, 1997, 89～100
437 Sato G. Animal cell culture. In：Lanza R., Langer R., Chick W., eds. Principles of tissue engineering. USA：R. G. Landes Company, 1997, 101～109
438 Mironv, V., Boland, T., Trusk, T. Organ printing：computer – aided jet – based 3D tissue engineering. Trends in biotechnology, 2003, 21（4）：157～161
439 崔中和．面向21世纪的生命科学．生物学通报，1994，29（8）：1～4
440 姚康德，王向辉，侯信．组织工程相关生物材料．天津理工学院学报，2000．16（4）：1～5
441 张宇民，赫晓东，韩杰才．梯度功能材料．宇航材料工艺，1998，5：5～10
442 Pappas NA, Robert L. New challenges in biomaterials. Science. 1994,（263）：1715～1720.
443 Mironv, V. Beyond cloning：toward human printing, The Future. 2003, 34～37
444 Bruck H. A one – dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves. International Journal of Solids and Structures, 2000,（37）：6383～6395
445 Suresh S. Graded materials for resistance to contact deformation and damage. Science, 2001, 292（29）：2447～2451
446 Patrikalakis N., Sachs E., Cho W., et al. Representations and exchange standards for functionally graded materials. ONR Annual Summary Report, 1999
447 Bhashyam S., Shin K., Dutta D. An integrated CAD system for design of heterogeneous objects. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6（2）：119～135
448 Jackson T., Liu H., Patrikalakis N., et al. Modeling and designing functionally graded material components for fabrication with local composition control. Materials and Design, 1999,（20）：63～75
449 Yoo J., Cho K., Bae W., et al. Transformation – toughened ceramic multilayers with compositional gradients. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81（1）：21～32
450 Cho W., Sachs E., Patrikalakis N. Solid freeform fabrication with local composition control. Quarterly of the Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers. Dearborn：SME, 2001, 7（2）：1～5
451 Cho W., Sachs E., Patrikalakis N., et al. Methods for distributed design and fabrication of parts with local composition control. In：Proceedings of the NSF Design and Manufacturing Grantees Conference, Tampa, FL, USA, 2001, 20～28
452 Patrikalakis N., Sachs E., Cho W. Methods for design and interrogation of FGM objects. ONR Annual Summary Report, 2000, 33～46
453 Cho W., Sachs E., Patrikalakis N., et al. Local composition control in solid freeform fabrication. In：Proceedings of the NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference, San Juan, Puerto Rico, 2002
454 Liu H., Cho W., Jackson T., et al. Algorithms for design and interrogation of functionally gradient material objects. In：Proceedings of ASME DETC/CIE, 26 – th ASME Design Automation Conference, Baltimore, Maryland, 2000, 141
455 Liu H. Algorithms for design and interrogation of functionally graded material solids：[Master's thesis]. MA：Massachusetts Institute of Technology, 2000
456 Jackson T. Analysis of functionally graded material object representation methods：[PhD Dissertation]. MA：Massachusetts Institute of Technology, 2000
457 Wu H., Sachs E., Patrikalakis N., et al. Distributed design and fabrication of parts with local composition control. In：Proceedings of the NSF Design and Manufacturing Grantees Conference, Vancouver, BC, Canada, 2000
458 Sachs E., Patrikalakis N., Cima M., et al. The distributed design and fabrication of metal parts and tooling by 3D printing. In：Proceedings of the NSF Design and Manufacturing Grantees Conference, Long Beach, California, 1999, 15～18
459 Jackson T., Patrikalakis N., Sachs E., et al. Modeling and designing components with locally controlled composition. In：Procedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin：The University of Texas at Austin, 1998, 259～266
460 Sachs E., Patrikalakis N., Boning D., et al. The distributed design and fabrication of metal parts and tooling by 3D printing. Proceedings of the NSF Design and Manufacturing Grantees Conference, Monterrey, Mexico. 1998, 35～36
461 Chiu W., Tan S. Multiple material objects：from CAD representation to data format for rapid prototyping. Computer – Aided Design, 2000, 32：707～717
462 Kumar V., Dutta D. An approach to modeling multiple material objects. Proceedings of the 4th ACM Solid Modeling Symposium. Atlanta, 1997, 336～345
463 Sun W., Lin F., Hu X. Computer – aided design and modeling of composite unit cells. Composites and Technology, 2001,



61：289～299

464 徐健，吴任东，卢清萍．如何提高熔融挤压制造质量．中国机械工程，2000（增刊），11：112～114

465 Liangwei Wu，Guodong Hong，Rendong Wu，et al．The Accuracy Analysis and Improvements in the transition of CAD models to MEM prototypes．In：Yongnian Yan，eds．Progress in Rapid Prototyping，Manufacturing and Rapid Tooling．Xi'an：Shannxi Science and Technology Press，1998，264～271

466 毛起广．表面粗糙度的评定和测量．北京：机械工业出版社．1991

467 孙家广，杨长贵．计算机图形学（新版）．北京：清华大学出版社，1995

468 赵万华，李涤尘，洪军等．光固化快速成形中复杂零件型面精度形成机理研究．中国机械工程，1997，8（5）：37～39

469 Kamesh Tata．Efficient Slicing for Layered Manufacturing．Rapid Prototyping Journal，1998，4（4）：151～167

470 Emmanuel Sabourin，Scott A．Houser，Jan Helge Bohn．Adaptive slicing using Stepwise uniform refinement．Rapid Prototyping Journal，1996，2（4）：20～26

471 Justin Tyberg，Jan Helge Bohn．Local Adaptive Slicing．Rapid Prototyping Journal，1998，4（3）：118～127

472 邹国林，贾振元，郭东明等．FDM 工艺精度分析与正交试验设计．电加工与模具，2001，（4）：23～26

473 任晓．球体表面形状误差的空间网络测量法探讨．宁夏工学院学报，1995，7（3）：41～49

474 倪骁骅，邓善熙，金波．形状误差不确定度评定问题初探．实用测试技术，2001，（4）：1～3

475 姜永军，张玉宝．形状误差检测数据处理的一种新方法——逐次删点法．包头钢铁学院学报，1996，15（2）：89～93

476 Georges M．Fadel，Chuck Kirschman．Accuracy issues in CAD to RP Translations．Rapid Prototyping Journal，1996，2（2）：4～17

477 Richard H Crawford．Computer Aspects of Solid Freeform Fabrication：Geometry，Process Control，and Design．In：Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium 1993．Austin：University of Texas at Austin，1993，102～112

478 Jinhong Li．Precise Rapid Prototyping．In：Proc．of the 4th International Conference on Rapid Prototyping．Dayton：University of Dayton，1993，349～355

479 Prashant Kulkarni，Debasish Dutta．An Accurate Slicing Procedure for Layered Manufacturing．Computer－Aided Design，1996，28（9）：683－697

480 B．Pham．Offset Curves and Surfaces：A Brief Survey．Computer Aided Design，1992，24（4）：223～229


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第 7 篇

电加工机床质量控制与检测

主　编　连克仁
主　审　叶　军　王至尧
副主编　徐均良
编　写　连克仁　章国荣
　　　　陈远龙　靳传玉
审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会





第1章 绪 论

1 坚持“质量第一”的方针

产品必须坚持“质量第一”的方针，这是国家的重大政策，也是企业都应该遵循的准则。特种加工机床由于技术含量比较高，市场竞争日趋激烈，因此将产品质量放在第一位的要求就越显突出。对质量的控制与要求，包括了对产品质量的控制与要求、产品生产过程的质量控制与要求、产品售后的服务质量的控制与要求。

为了加强对产品质量的监督管理，提高产品的质量水平，明确产品的质量责任，保护消费者的合法权益，维护社会主义市场经济的秩序，国家制订了《产品质量法》及其它相关的法律、法规，并颁布了一系列国家、行业标准，特别是强制性标准。所有这一切都是为了增强产品的竞争力，提高制造业的水平，加速我国社会主义现代化建设。

2 采用国际标准和国外先进标准

所谓采用国际标准和国外先进标准，是指把世界上重要的三大国际组织，即国际标准化组织（ISO）、国际电工委员会（IEC）和国际电信联盟（ITU）所制订的标准，以及国际上公认的、有权威性的国外区域标准、工业先进国家的标准转化为我国的标准，并贯彻执行。

目前我国特种加工机床行业现行有效标准中，GB/T 5291.1—2001《电火花成形机 精度检验 第1部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）》标准为等效采用ISO 11090-1：1998《机床 电火花成形机（EDM）检验条件 术语和精度检验 第1部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）》的标准。GB 13567—1998《电火花加工机床 安全防护技术要求》标准中引用的GB/T 5226.1—1996《工业机械电气设备 第1部分：通用技术条件》标准已为GB 5226.1—2002《机械安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件》标准所替代，后者为等同采用IEC 60204-1：2000《机械安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件》（第4.1版）标准。

标准的先进性反映了技术水平的先进性。通过采用国际标准和国外先进标准，可以推动国家科技进步，尤其是产品的技术进步，推动我国由制造大国向制造强国的转化，有利于推进国际贸易，消除国际贸易中的技术壁垒，促进产品的出口，有利于合理使用资源，更好地保护用户的合法权益，有利于保护人类的环境。

3 产品的认证制度

随着我国社会主义市场经济的建立和完善，特别是我国加入WTO后，产品的合格评定正在逐步与国际接轨，向产品认证制度过渡。所谓认证是指由认证机构证明产品、服务、管理体系符合相关技术规范或者标准的合格评定活动。而这个认证机构应是由国务院认证监督管理部门确定的认可机构予以承认的，包括认证机构、检查机构、实验室。目前我国已经在19类132种产品中开展了“3C”认证，即“中国强制认证（China Compulsory Certification）”，就是对产品符合安全环保、公共安全要求的一种强制性检查认证。国家已经颁布了《认证认可条例》，使该项工作和活动纳入了法制化、规范化的轨道。

4 建立质量保证体系

建立一套适合于自己企业特点的、完善的质量保证体系，是现代企业的一个基本要求。使得不仅是产品质量，而且包括整个生产过程和售后服务的质量都处于严格的可控状态。这也是评价产品的质量水平、衡量企业的质量管理的重要条件。同样，质量保证体系是否符合标准、规范及有关法律、法规的质量要求，也须由认证机构来评定、进行鉴别，并提供证明。现在通常进行的GB/T 19000（idt ISO 9000：2000）、GB/T 19001（idt ISO 9001：2000）、GB/T 19004（idt ISO 9004：2000）等的认证，就是跟国际接轨的一种质量管理体系的认证。2000版的SIO 9000标准提出了：以顾客为关注焦点、领导作用、全员参与、过程方法、管理的系统方法、持续改进、基于事实的决策方法、与供方的互利关系等八项质量管理原则。这八项原则总结了各国多年的研究成果和实践经验，体现了质量管理的基本规律，是指导企业进行质量控制的准则。

编写：连克仁（苏州电加工机床研究所）



第2章　电火花加工机床的质量控制

对产品的质量控制，GB/T 19000（ISO 9000）族系列标准向人们提供了一整套质量管理和质量保证的模式。企业要求根据自身的情况和特点，按照ISO 9000族中相关标准的要求，建立完整的、科学的、行之有效的质量管理体系，才能控制产品的质量，使自己的产品在现代市场经济的条件下，不断满足用户的需求。

电火花加工机床作为一种机床产品，对于一般机床生产过程中需要控制的质量环节，或者说按照ISO9000族标准的要求需要控制的所有要素，对保证电加工机床的产品质量都是有效的。电火花加工机床的质量控制，包括对机械部分、电气系统（脉冲电源、数控系统、机床电器）以及联机调试过程的控制。机械部分包括机床主体（基础件、传动链、走丝机构或主轴头等等）、工作液系统等的质量要求与质量控制，涉及的是机械部分对加工件的加工要求与机床的装配要求，已有较多著作论及。因此这里仅对电火花加工机床的核心部分电气系统及机床产品最终质量有着直接影响的联机调试的内容与要求作一介绍。

1　电气系统的质量控制

1.1　元器件的采购供应

（1）定牌、定供货商

对元器件的采购与进货，小到电容、电阻，大到PC板、机床电器、电机，都必须定牌、定供货商。发生变更时，则先要进行内部试验，小批跟踪试用，才能批量进货。试验与试用，有时长达几周、几个月，才能得出初步结论。但这是必需的。因此相关部门要早作准备，留有充分的余地。在评价供货商的供货价格、供货周期、供货质量、售后服务等诸多因素中，“货物质量”始终是第一位的，是不能舍弃的。

（2）进货检验

对量大面广的电气元器件及关键件进行进货检验，对于防止批量返工，保证数控系统、伺服系统及脉冲电源的可靠性和关键指标，是十分必要的。进货检验时，要按器件的功能、重要程度、单价、数量、所拥有的检验仪器等综合分析后，分别对该种元器件是全检还是抽检、抽检比例的多少、以及检验的项目和方法做出明确的规定。一般情况下可按下列原则进行。

1）半导体元件和电容的抽检数量应不少于3%。当封装为若干小包装时，应从每个小包装内分别平均抽取检验品。同一品牌及型号规格的元器件，经检验和使用，连续三批不良品率低于1%，可列入免检品。

2）功率电阻与电机要全部检验。经检验和使用，连续三批不良品率低于3%，可以抽检，抽检率应不少于20%；非末级功率电阻，经检验和使用，连续三批不良品率低于1%，可列入免检品。

功率电阻的外观检查，要求标记清楚，外形尺寸和型号规格符合技术文件要求。电阻值用数字电桥检测，误差至少小于3%～5%才为合格。电机与变压器的外观检查，要检查外观有否磕碰划伤，型号规格应符合定货要求，有出厂检验单或合格证。安装和连接的尺寸（电机轴轴径尺寸、电机法兰盘止口尺寸、电机或变压器安装孔孔距等）应在公差范围内。测量工具用示值为0.02的游标卡尺。

3）计算机及其组件（PC板、工控机板、显示卡、各类显示器、键盘、电源、电子盘、硬盘等）应全部检验。

计算机组件应检验型号规格是否符合技术文件和定货的规定，外观是否完好，标记是否清楚。计算机组件应在成套后通电，用相关的检测程序对CPU主板、内存、硬盘、键盘、显示器等分别测试。测试合格后在被检件上贴上合格标记。

过去，为了控制元器件的质量，采用进货检验时全部通电测试、老化筛选的方法。随着元器件功能的日益提高，元器件制造厂对质量的控制，以及元器件进货量的加大，此种方法在国内外均已淘汰，进而采用供货商（供货厂）实行品牌质量保证的控制体系。实际证明，该种方法对电子元器件的质量是可以保证的，也降低了成本，避免了老化测试不当对元器件的损坏。

4）二极管、三极管和整流桥等半导体元件，要进行外观标记、外形尺寸的检查。根据规定的型号规格及指标，用万用表检验管脚，用图示仪检验反向耐压。检测反向耐压时，将图示仪电压曲线调整到高于额定电压20%，曲线在额定电压范围内无击穿，即为合格。

1.2　防止静电对器件与系统的损坏

人体表面的静电荷，会对触摸到的电子元件发生放电，造成损害。除了损坏元器件外，还将影响系统的稳定性。如果不加防范，后果十分严重，并且故障范围无规律，排除十分困难。电子元件和组件（PCB板）的防静电措施，既是电气系统质量控制的一道重要防线，也是贯彻电气系统制造全过程的系统工程。

（1）电子制造部门的防静电措施

电子制造部门要对电子元件和成品的存储、转运、制造等每个环节，建立严格的防静电制度，采取一系列防护措施，其中主要包括以下这些环节。

1）电子元件和成品要在防静电盒内存放。当然，电子元件和成品应该采用正规厂商供货的、有封装的产品。那种在市场上随便抓来的器件肯定是不符合防静电要求的。不仅如此，在搬运和转移时，也要避免人手直接接触，而应将其置于防静电的盒内。

2）集成电路在插装前不要打开封装，要保持在原包装内。

3）电子元件和成品的物料架和工作台，必须良好接地，铺设防静电板。

4）操作人员要穿防静电工作服，在接触电子元件和成品前，必须佩戴接地良好的防静电腕带。

5）有条件的部门，可铺设防静电地板。电子制造部门也可采取早晚洒水拖地若干次的办法，提高环境湿度，减少静电发生和积累的概率。

（2）调试工作的防静电措施

电气系统调试人员接触电子元件和成品的频次较高，流动性大，一旦出事，危害也很大。因此，电气系统调试人员是防静电的重要因素，调试工作是防静电的重要环节。在机床调试中，必须绝对遵从下列规则：

1）在取出电子模块前，电柜必须断电；

2）戴上防静电保护腕带，并连接到电柜的框架上；

3）拿PCB板只能抓住其把手，不要接触板体上的电子器件部分；

4）完成作业后，有问题的模块放回防静电的袋子或防静电的零件周转盒中保存。

1.3　印刷板制作的质量控制

印刷板是电加工机床电气系统中最重要的部件之一，印刷板的制造质量对机床的工艺水平、系统的可靠稳定等诸多方面的性能产生直接影响。

（1）核对元器件是否符合设计要求

1）电阻　元件代号 R，阻值用 Ω、k、M 表示，常用色环进行标注，颜色与数字对应如表 7.2-1 所示。

表 7.2-1　电阻的颜色与阻值数

颜色	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑
阻值数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0

色环电阻分 4 环和 5 环，要根据色环正确识别阻值大小和精度，举例如图 7.2-1。

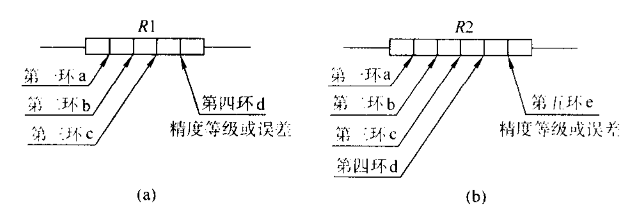


图 7.2-1　电阻阻值识别

（a）$R1 = ab \times 10^{c}\Omega$　例：a—红，b—黄，c—棕，$R1 = 24 \times 10^{1} = 240\ \Omega$

（b）一般情况：$R2 = abc \times 10^{d}\Omega$　例：a—棕，b—紫，c—灰，d—棕，$R2 = 178 \times 10^{1} = 1\ 780\ \Omega = 1.78\ \mathrm{K\Omega}$；

若 d 为金色环，则 $R2 = abc \times 10^{-1}\ \Omega$，上例，$R2 = 178 \times 10^{-1} = 17.8\ \Omega$；

若 d 为银色环，则 $R2 = abc \times 10^{-2}\ \Omega$，上例，$R2 = 178 \times 10^{-2}\ \Omega = 1.78\ \Omega$

电阻的功率值用 W 表示，如 0.5（1/2）W，0.25（1/4）W，0.125（1/8）W、2W，5W 等；电阻的精度用%表示，如 1%，5%等。

2）排阻　排阻分有公共端和无公共端、单排和双排几种形式，标有“·”处为单排排阻的公共端，如图 7.2-2 所示。

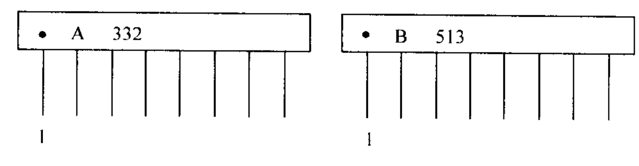


图 7.2-2　排阻的公共端

3）电容　元件代号 C，电容耐压 V，容量相同，耐压高的电容可兼容耐压低的电容。

容量用 F、μF、nF、pF 表示，但常用三位数字表示，如 | A | B | a |，则其容量为 $AB \times 10^{a}$ pF，例：标为“104”，则容量 $= 10 \times 10^{4}$ pF = 100 000 pF = 0.1 μF。

极性电解电容、钽电容等引线有正负之分，有的有“+”、“-”标记，有的以较长引线为“+”。电容的极性接反，会损坏电容，所以要重点检查。

4）晶体管　用万用表或根据产品样本判别清楚管脚。对于二极管、稳压管，一般有色环的一端为负极。对于三极管，可用万用表判别极性，方法如图 7.2-3。

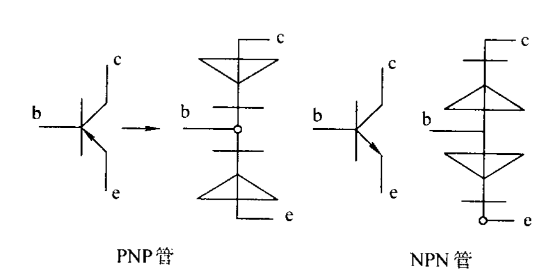


图 7.2-3　三极管的极性判别

根据以上等效电路图，可用万用表测出 b 极。金属封装的外壳往往代表三极管的 c 极，此类三极管的三极一般按逆时针 e，b，c 顺序排列，外壳标志逆时针方向第一脚为 e。也可以用万用表先找出 c，再找出 b，便可判断出三个极来。

5）集成电路　双列直插式的集成电路，从半圆插口逆时针数为第一脚，其余顺序往下。

（2）规范元器件的安装工艺

1）防静电　安装过程戴防静电手环。

2）元件整形　同功率的电阻按相同的参数（间距等）在整形机上整形；同种类印刷板的相同元件整形后应成同样形状；整形后的元件分别放置在有标记的元件盒中，不得混放；集成电路同样要整形，整形后不得长期裸露在空气中而不插入印刷板，否则应装回 IC 包装管，多余的元件及时放回原相应的位置。

整形元件图例见图 7.2-4。

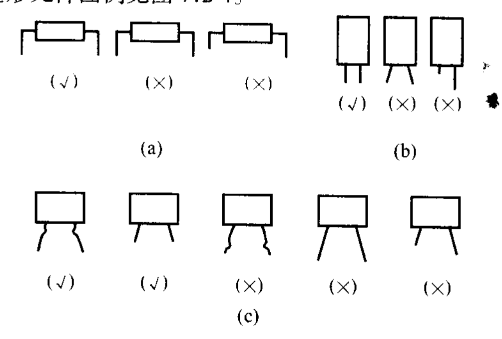


图 7.2-4　电子元件的整形

3）预装与插件　插件前将有污迹的零件表面清洗干净方可安装。应先装需用螺钉紧固的元件（如安装 PCB 插头座、装压装螺钉、压装螺母等）；再将不焊的元件位置用耐高温胶带贴上。插件应按由低到高、由小到大的顺序进行，对于 $R \leqslant 1/4\ \Omega$ 的电阻，小功率晶体管应贴近印刷板安装，对于 $R > 1/4\ \Omega$ 的电阻，应与印刷板保持一定的距离。同一印刷板上同种元件与板的距离应保持一致。插件的示意见图 7.2-5。

(1) 预装
(2) 贴装
(3) 先插低元件
(4) 后插高元件

图 7.2-5 插件示意图

4) 焊接　焊接的方法分手工焊和波峰焊。手工焊一定要用外壳接地良好、温度可控的电烙铁。波峰焊一般能保证焊接质量，但要按操作要求，监控锡锅温度、助焊剂发泡气压、机架高度、波峰高度、传送带速度等。控制好各有关的参数和条件，才能保证焊接质量。

5) 修板　修板是在上述作业结束后的一道十分重要的工序，主要作用为：清除印刷板背面残留物质；使波峰焊时浮起的元件用烙铁加热，恢复成插件的位置，如图 7.2-6；检查全部焊点，有无漏焊、虚焊、焊点粘连、焊点堆积、焊点干瘪等，并予以修正，如图 7.2-7；重新检查 IC 及有极性元件的极性是否安装正确；检查板后焊脚，如 > 3 mm，则应修剪；用毛刷清扫印刷板两面，必要时用酒精擦净；粘贴必要的标志，粘贴部位用酒精擦净后方可贴上。

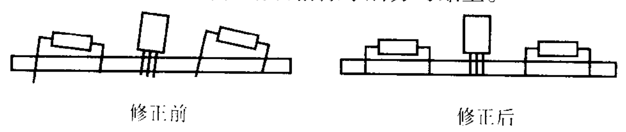


图 7.2-6 修板中插件的整形

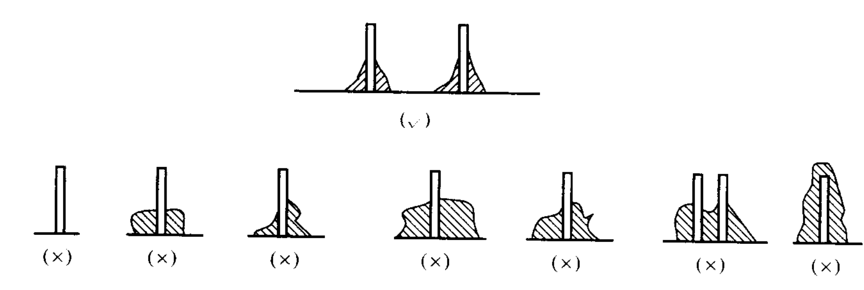


图 7.2-7 焊点的修正

1.4 PCB 板的测试与检查

对较为复杂的 PCB 板，在安装完毕后应进行测试，以检查元器件及安装、焊接质量。测试的顺序为：

单板静态测试→单板通电测试→电柜模拟测试→联机运行

(1) 单板静态测试

可采用移动针式（固定针床式）探头 PCB 测试仪，按编制的程序，对板上每个元件的管脚之间逐点测试，与基准值比较。通过测试，可以迅速诊断出 PCB 板制造过程中对元器件的错焊、漏焊及元器件内部的通断等质量问题。如果经测试发现有差错，可以及时更改，以避免通电后对某些元器件的损坏。

(2) 单板通电测试

1) PCB 板测试台　对于不具备针式探头 PCB 测试仪的生产企业，就无法作平板静态测试检查。但是单板的通电测试，则是必须进行的检查项目。单板通电测试没有通用的设备，各企业要根据单板的不同功能、输入/输出口和控制/调节点，设计制造出各种自已的 PCB 板测试台，对焊接检查后的板通电测试。通过模拟给定/改变相关的输入信号，用万用表、示波器等检测规定测试点/输出点的电压、波形等参数的大小及变化等。

没有经过单板静态测试的，可通过通电测试所得到的各点的结果，分析诊断出元器件的错焊、漏焊及元器件内部的质量问题。已经经过单板静态测试的，则可进一步确定该板上全部元器件的质量和线路板的功能是否满足了设计要求。

单板测试台对较为复杂的、关键的 NC 控制板、接口板、脉冲信号板必不可少；对控制、检测整个脉冲电源的质量、诊断单板的故障至关重要，也最为实用。但单板测试台的设计可简可繁，投入可大可小，企业应在综合考虑后确定测试台的内容、功能。

脉冲电源功率板的测试，应进行带模拟负载的大电流，尤其是提供用户使用的窄脉宽、大电流的单板老化测试。通过≥2 h 的老化测试考核元器件及设计、制作的质量。

2) 测试要求　为了控制和保证测试的质量，要制定测试工艺和检测表，规定测试步骤，明确测试点和测试值，做好相关记录和测试标记，以便进行质量跟踪和故障分析。

单板通电前，首先目测所有有极性元件的方向，板上跨接器的设置。然后用万用表测试输入/输出点的阻值是否正常，排除由于各种原因造成的短路。在将板插入测试台之前，检测测试台给 PCB 板供电的交/直流电源电压及相关指示灯是否正常，检查测试台的相关开关、电位器等设置位置。正常后断电插入待测板。

测试前检查仪器仪表的挡位、量程、衰减倍数等。测试台通电后，首先观察各电源指示灯的状态，测量板上所有的供电电源是否正常，然后再测其他的波形、电压等。

(3) 电柜模拟测试检查

这是对 PCB 板质量是否满足整个系统性能、功能要求所必须进行的检查，通过 PCB 板在电柜上的测试和高低温老化、模拟负载的模拟运行，基本上可保证电气系统的基本性能。该项调试检查，在实际生产中可归并在整机调试一并进行。

(4) 联机运行检查

通过电柜和主机联机后的空运行、综合性能测试和放电加工，达到对 PCB 板性能和质量全面的考核。通过 48 ~ 100 h 的连续/断续运行，可基本筛除早期失效的电子元器件，进一步提高脉冲电源和控制系统的可靠性。在实际生产中，该项联机运行检查可归并在整柜联机调试运行一并进行。

1.5 线缆制作的质量控制

线缆的制作质量，直接对系统的可靠性等产生影响，因此是保证电气系统质量的不可忽视的环节。

(1) 合理选择电缆电线

电线电缆的选择要符合设计要求，一般应遵循下列



原则。

1）电柜内的互连线需用多股铜线。

2）有抗干扰要求的要采用带屏蔽电缆。

3）传输重要信号的要采用双绞屏蔽电缆。

4）床身工作台等接地线尽量采用铜编织线，接地可靠，抗干扰效果好。

5）接功率电阻的导线，则必须采用耐高温线（>200℃）。

6）导线颜色的选用应符合国标规定：

① 主回路（AC/DC）用黑色；

② 交流控制回路用红色；

③ 直流控制回路用蓝色；

④ 保护接地用黄绿双色；

⑤ 与保护导线相连的电路用白色；

⑥ 电缆内芯线的颜色不受上述规定的约束。

（2）正确制作线缆接头

1）剥线　无论采用剥线钳还是电工刀或其他工具，均要保证线芯、电缆屏蔽层或芯线外皮不受损伤。端头需压接端子的导线应根据所压端子情况确定剥线长度，见图 7.2-8。

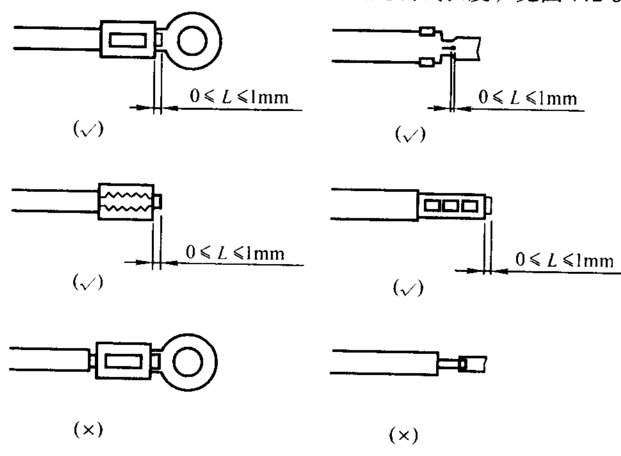


图 7.2-8　压接端子与剥线要点

2）压接　压接端子应使用合适的压线钳的适当档位或合适的端子压接机。挡位小会使端子变形，挡位大则使线芯与端子接触不紧，造成松动虚焊。因此，严禁用不合适的工具压接端子。同时，压接部位应该适当，见图 7.2-8。

端子压接后应检查压接部位达到一定的拉拔力，可用弹簧秤按表 7.2-2 进行检查。

表 7.2-2　压接端子拉拔力推荐值

导线截面/mm²	规定的拉拔力/N
0.3	30
0.75	40
1.5	45
2.5	50
4	60
6	80
10	90
16	100
25	135
35	190

3）线号标志　作为表示导线连接位置和去向的线号标志必须清晰牢靠。常用的标志有几种：普通塑料管，异形塑料管，线号胶带和标牌扎带。应根据导线的规格选用适当直径的塑料管，用打号机打完号后清理色带污迹。截成的线号管长度应基本一致，一般为 13~14 mm，线号应在线号管的中心位置。线号的方向应符合规定，如图 7.2-9 所示。缠线号胶带时应保持双手干净，无汗，或者带上白手套操作。

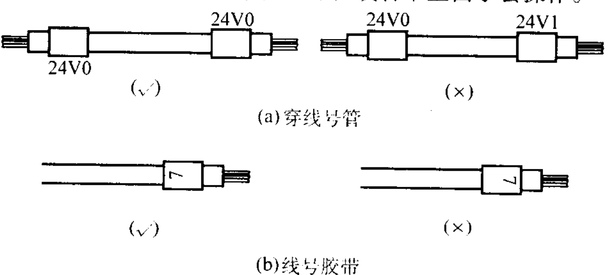


图 7.2-9　线号标志示例

为了批量生产定货、管理的需要，以及安装、调试更加方便准确，每一组线缆还应标上线缆本身的编号（图号），或者将编号、连接位置、线号复合标注。标记一般采用记号笔在标牌扎带上人工书写，或者将打印制作完的标记插入专用的电缆标记框，再用扎带固定。

1.6　电柜安装

1）安装前的准备　应看清所安装部分的装配图、接线图及装配工艺文件，明确设计意图，掌握工艺流程。

根据图纸、物料配套表，检查核对配套的元器件、零部件的型号规格、数量、外观质量。

2）接线　线缆的制作要求如 1.5 所述。在接线作业中还需保证满足下列要求：走线应平直，用管卡或扎带固定；所有连接导线中间不得有接头；交流和直流导线要避免平行，防止干扰；一个接线端子（包括接地端子和汇流条）的螺钉不得接两根导线。

3）安装和紧固　元器件或组件的安装必须按图纸要求或走线最近的位置安装，同型号同规格的元器件，应用同型号同规格的紧固件，不得随意取代。

各种形式的紧固件必须用相匹配的工具，一旦槽口变形，立即更换损坏的紧固件。

走线槽、卡轨等一定要按规定长度截取，要求下料平直、整齐、无毛刺。

所有安装孔应事先设计加工成形，修去毛刺。这样可避免安装时临时再做，保证加工孔的质量，防止对已处理表面的磕碰划伤。

部件或电柜安装完毕后，应检查所有紧固件，在关键的紧固件上做出红色标记，并用高速风枪清扫部件或电柜，防止杂物夹杂在元器件中而造成不良后果。

为了大幅度提高劳动生产率，提高工作质量，国内外先进的电加工制造企业，对电柜和主机的装配均实现了流水线作业。将每个产品的装配过程，按装配顺序，划分为耗时相等、节拍一致的若干个工位。每个工位的位置周围，配备上完成该工位规定工作需要的全部物料，包括零部件、标准件、辅料、图纸、工具等。上一工位工作完成，作业者进行规定的检验，填写相关记录，然后在规定的时间内用铲车、吊车等运输工具将产品及质量记录移至下一工位，由下一工位的作业者接力式工作。为了保证每个工位的产品基本同时完成，要特别注意各工位工作量的均衡。同时，每个工位工作量的大小必须适当。工作量太小，则移动频繁，占用人数较多；工作量过大，则相应的物料较多，占地大，取件线路长，影响效率。同时，作业者的工作涉及面广，对工艺、图纸、检验、技艺的要求过高。一般来说，单工位占时在 2~4 h，每个作业人员仅干 1~2 个工位的工作比较适当。长期

从事某一个或两个工序，工艺、图纸、检验、技艺相对单一，作业者容易动脑筋想办法，便于记忆和掌握控制该工序的工作要领和质量要领，从而达到降低难度，提高质量的目的。随着熟练程度的普遍提高，则可加快移动的节拍。由一个人将电柜从头装到尾的方法是落后的小生产方式。采取流水线的方式组织装配生产，是提高产品质量和产量的有效途径。

1.7 电柜的调试

电柜总装完成后，要与专用的工装连接，模拟主机的各类电机、限位开关及其他机床电器的I/O接口的动作，检测脉冲信号等，确认电柜基本正常，才可进行最终的联机加工调试。这样可及早暴露故障，确保电气系统的质量。各类电加工机床的电气系统（电柜）的功能不尽一样，各个生产企业也都可以有自己的调试内容与程序，不能是一个模式，也不能一一列举。下面仅对电火花线切割机和电火花成形机的一般调试过程与要求作一介绍。

1.7.1 电火花线切割机电柜调试

（1）通电检查

1）准备

① 各部件安装是否牢固，检查紧固件；

② 检查各变压器的接线、各开关的接线；

③ 各电缆和导线的标牌和线号是否齐全准确；

④ 所有接地、屏蔽压接是否正确；

⑤ 各印刷板的位置、标签及内部跨接器的设置；

⑥ 各断路器、热继电器的电流设置值是否符合规定；

⑦ 电柜是否清洁，外表是否有划伤，过滤网是否安装。

2）用摇表检查三相电源进线，要求相间及对地电阻大于1 MΩ；拔下各系统（NC/伺服/脉冲电源）电源插头，断开各PCB板、微机板及有关短路器；将开门断电处封接。

3）通电

① 先合外网电源，再合电柜主开关，然后启动；

② 检查用于冷却的风机状态，转向是否正常；

③ 用万用表测量三相电源进线/各变压器输出/NC电源插头/各系统/控制回路/主回路的交流、直流电压值是否符合规定，极性是否正确；

④ 关急停，急停按钮应自锁；

⑤ 将所有拔出的电源/PCB板插好（柜内所有的PCB板应经过测试合格），合上断路器；

⑥ 连接电源柜与调试工装的连线。

（2）系统设置

1）再次启动，按规定对NC系统设置；

2）对液泵的控制变频器进行设置；

3）重启动，直至进入主画面。

（3）功能、参数测试与检查

1）检查NC系统设置的手动、自动、编辑等状态是否齐全，可否正常保持及转换；

2）检查CAD/CAM的功能，及其编制的图形程序能否在主画面内运行；

3）检查键盘、鼠标、软驱、CRT图形位置/亮度/对比等功能。

4）进入诊断状态

① 对各I/O点进行相关动作的测试；

② 脉冲电源控制开关的通/断检查；

③ 打开脉冲电源，检查脉冲信号板的供电电压；

④ 检查脉冲电源主回路各挡电压值与极性（高/中/低压等）；

⑤ 冲液泵（低速走丝机增加高压泵）启/停检查；

⑥ 运丝（低速走丝机为收丝/放丝）电机启/停/制动/调速检查；

⑦ 各轴限位功能是否正常；

⑧ 丝筒换向（高速走丝机）/断丝检测；

⑨ 上丝手柄（高速走丝机）/收丝机构（低速走丝机）与运丝机构的互锁检查；

⑩ 电极丝感知功能检查；

⑪ 伺服的进给/回退；

⑫ 其他控制功能的检查。

5）检查手控盒上操作按钮的功能

① 点动速度的调节，如高速、中速、低速、单步等；

② 各轴的点动和方向的控制，如X+/-、Y+/-、U+/-、V+/-、(Z+/-)等；

③ 冲液泵（低速走丝机增加高压泵）启/停；

④ 运丝启/停等。

6）加工前的准备功能检查　通过规定操作，观察相关轴的坐标值变化和工装电机的动作，确认有关准备功能是否正常，包括轴的移动、坐标置零、丝找正、找孔中心、找边、找角等NC功能。

7）按规定操作要求进行并检查相关设置是否正常，包括语言选择、尺寸单位、公制/英制、图形缩放比例、镜像开/闭等NC功能（高速走丝机增加工件厚度、下导丝嘴至台面距离、上导丝嘴至台面距离）。

8）自动加工功能检查　编制规定的加工程序并运行，检查供液、运丝、轴动作、脉冲电源开关、电压表指示等是否正常。并对诸如无人关机、模拟试切、图形预演、结束响铃、条件切换、3B/ISO代码互换等功能一并进行检查。

9）编辑功能检查　检查文件装入、存盘、换名、删除、清屏、通讯、软盘拷贝等功能。

10）脉冲电源的检测　可通过在诊断条件下闭合脉冲电源开关后，用示波器进行相关波形测试，测试点以功率管输入信号前级为主。

① 脉冲宽度　固定脉冲停歇的设置，改变脉冲宽度，测试脉宽波形是否按脉宽表规定变化，其值是否符合规定的允差。

② 脉冲停歇　固定脉冲宽度的设置，改变脉冲停歇，测试停歇波形是否按停歇表规定变化，其值是否符合规定的允差。

③ 电流控制　将脉冲宽度与停歇均设置在一定的数值，如设置在20~30 μs左右，改变投入的功率管数，观察相关功率板上各管的输出端波形或指示灯的变化。

④ 最大电流　电极回路串大功率电阻，在较窄停歇、较大脉宽条件下，将投入的功率管数由低调高，主回路电流表的值相应变高，直至指定的最大值。

⑤ 进给伺服　改变伺服设置，用万用表测量指定芯片管脚电压。

⑥ 极性选择　改变极性，用万用表检测电极线是否有相应变化。

11）掉电记忆功能　编制和执行指定程序，在特定坐标位置关机。重新供电启动后，观察能否恢复掉电前的坐标，能否从掉电处继续执行程序。

12）电柜其他功能　检查除上述功能以外的其他功能，例如：

① 上丝电机（高速走丝机）的启/停，速度调节；

② 分组脉冲波形；

③ 开路电压；

④ 电柜温度检测及保护（低速走丝机）；

⑤ 丝找垂直信号的检测；

⑥ 水阻信号（低速走丝机）的检测与调整等。

（4）电柜的老化试验



电柜应经过老化试验，以检查电气系统在高温状态下的稳定性、可靠性等质量水平。在电加工机床产品的技术条件行业标准中，都有高温运行试验的项目。

1）准备　电极线接指定的功率电阻，连接各轴/运丝电机。

2）运行　在（40±2）℃的室温环境下、或者在电柜内部安装热源，将柜内温度控制在（40±2）℃，运行老化程序，使各电机和脉冲电源连续工作。

3）检查　老化结束后重新进行各项功能的检查。

所有的检查、测试都结束后，电柜可以移交至后续工作相关部门，比如移交至机电总装所在部门。移交前必须做好最后的确认工作，包括：

① 确认相关设置，如关镜像/交换，缩放比例=1，等；

② 检查引出的电极线/电缆插头的标记；

③ 检查电柜的铭牌、警示标牌、简图/配置图有否遗漏；

④ 各连接器是否紧固；

⑤ 印刷板是否安装牢固；

⑥ 电柜的外观及清洁度；

⑦ 填写相关记录，例如电柜编号、调试人、NC及各PCB板内软件版本，重要PCB组件/伺服驱动板的版本等。

1.7.2　数控电火花成形机电柜调试

（1）通电检查

1）准备

① 各部件安装是否牢固，检查紧固件；

② 检查各控制/主变压器的接线、各开关的接线是否正确，有否松动；

③ 各电缆和导线的标牌和线号是否齐全准确；

④ 所有接地、屏蔽压接是否正确；

⑤ 各印刷板的位置、标签及内部跨接器的位置；

⑥ 各断路器、热继电器的电流设置值是否符合规定；

⑦ 电柜是否清洁，外表是否有划伤，过滤网是否安装；

⑧ 万用表检测各功率电阻，有否短路/断路，阻值是否在允差范围内。

2）用摇表检查三相电源进线，要求相间及对地电阻大于1 MΩ；拔下各系统（NC/伺服/脉冲电源）电源插头，断开各PCB板、微机板，将开门断电处封接。

3）通电

① 先合外网电源，再合电柜主开关，然后启动；

② 检查用于冷却的风机状态，转向是否正常；

③ 用万用表测量三相电源进线/各变压器输出/NC电源插头/各系统/控制回路/主回路的交流、直流电压值是否符合规定，极性是否正确；

④ 关急停，急停按钮应自锁；

⑤ 将所有拔出的电源/PCB板插好（柜内所有的PCB板应经过测试合格），连接电源柜与调试工装的连线。

（2）系统设置

1）再次启动，按规定对NC系统设置；

2）重启动，直至进入主画面。

（3）功能、参数测试与检查

1）检查NC系统设置的手动、自动、编辑等画面是否齐全，可否正常保持及转换。

2）检查键盘、鼠标、软驱、CRT图形位置/亮度/对比等功能。

3）进入诊断状态：

① 对各I/O点进行相关动作的测试；

② 打开脉冲电源，检查脉冲信号板的供电电压；

③ 检查脉冲电源主回路低压（如100 V）/高压（如300 V）的电压与极性；

④ 液泵的启/停与转向检查；

⑤ 液面开关功能检查；

⑥ 液温控制检查；

⑦ 脉冲电源的极性转换检查；

⑧ 电容切换检查；

⑨ 各轴限位检查；

⑩ 接触感知检查；

⑪ 液槽门开关、电阻箱/电柜温度、着火及排风检测等其他各项安全联锁检查；

⑫ 冲液阀的控制检查；

⑬ 自动换电极系统的气压、电极卡头卡紧功能等各种位置信号与控制开关等其他各项功能检查。

4）检查手控盒上操作按钮的功能：

① 点动速度的调节，如高速、中速、低速、单步等；

② 各轴的点动和方向的控制，如X+/-、Y+/-、U+/-、V+/-、(Z+/-）等；

③ 液泵启/停；

④ 程序启/停等。

5）加工前的准备功能检查　通过规定操作，观察相关轴的坐标值变化和工装电机的动作，确认有关准备功能是否正常，包括轴的移动、坐标置零、找工件中心、找孔内心、找边、找角等NC功能。

6）按规定操作要求进行并检查相关设置是否正常，包括语言选择、尺寸单位、公制/英制、点动速度、感知速度、次数、回退量等功能。

7）自动加工功能检查　编制规定的加工程序并运行，检查供液、轴动作、脉冲电源开关、电压表指示等是否正常。并对诸如无人关机、模拟试加工、图形预演、结束响铃、条件切换等功能一并进行检查。

8）编辑功能检查　检查文件装入、存盘、换名、删除、清屏、通讯、软盘拷贝等功能。

9）脉冲电源的检测　可通过在诊断条件下闭合脉冲电源开关后，用示波器进行相关波形测试，测试点以功率管输入信号前级为主。

① 脉冲宽度　固定脉冲停歇的设置，改变脉冲宽度，测试脉宽波形是否按脉宽表规定变化，其值是否符合规定的允差；

② 脉冲停歇　固定脉冲宽度的设置，改变脉冲停歇，测试停歇波形是否按停歇表规定变化，其值是否符合规定的允差；

③ 电流控制　将脉冲宽度与停歇均设置在一定的数值，如设置在100 μs左右，改变投入的功率管数，观察相关功率板上各管的输出端波形或指示灯的变化；

④ 进给伺服　改变伺服设置，用万用表测指定芯片管脚电压；

⑤ 极性选择　改变极性，用万用表测试电极线是否有相应变化；

⑥ 高/低压复合波形发生与调节；

⑦ 当极间开路/短路/拉弧时，脉冲电源的自动调节。

10）掉电记忆功能　执行指定程序，在特定坐标位置关机。重新供电启动后，观察能否恢复掉电前的坐标并继续执行程序。

11）电柜其他功能　检查除上述功能以外的其他功能。

（4）电柜的老化试验

老化试验的作用及试验的内容等与电火花线切割机类似。

1）准备　电极线接指定的功率电阻，连接各轴伺服电机。

2）运行　在（40±2）℃的室温环境下，或者在电柜内

部安装热源，将柜内温度控制在（40±2)℃，运行老化程序，使各电机和脉冲电源连续工作。

3）检查　老化结束后重新进行各项功能的检查。

所有的检查、测试都结束后，电柜可以移交至机电总装部门，最后的确认工作与电火花线切割机相同，此处不再重复。

2　电火花加工机床的联机调试

将装配完成并经过检验的主机与电柜联线后，进行联机调试，这是保证机床的各项质量指标都符合要求的最终工序。联机调试的一般内容与要求如下。

2.1　机床外观检验

检查机床的涂漆/表面处理/接缝/颜色等质量。

2.2　安全可靠性检验

1）按 GB/T 13567 及 GB/T 5226.1 检验主机及电柜电气系统动力导线对地的绝缘电阻；

2）电柜（内部各点）及主机各部（床身，液槽，液泵，液箱，操作部位，机床外围，电器箱）保护电路的连续性测试；

3）主机及电柜电气系统非低压导线对地耐压测试；

4）残余电压的防护；

5）供电电源波动的测试（例行试验）；

6）抗干扰测试（例行试验）；

7）抗震测试（例行试验）。

2.3　主机几何精度检验

1）调水平；

2）几何精度检验　根据各类别机床的精度标准，对机床的几何精度作检验（详见第4章）。

2.4　机床性能检验

检验通电后机床各运动部件、功能部件的动作，脉冲电源的放电加工等性能。一般可包括：

1）机床的启动/急停可靠；

2）各轴行程/限位保护；

3）轴移动各挡速度平稳/可变；

4）轴移动/点动；

5）各轴运动的保护罩是否有干涉；

6）丝筒换向平稳可靠（适于高速走丝线切割机）；

7）丝张力机构的调节与平稳性检验（适于低速走丝线切割机）；

8）走丝丝速确认（适于低速走丝线切割机）；

9）丝找垂直（适于线切割机）。

机床在常温下作空运行及负荷试验，运行时间不应少于 24 h，检查内容一般有：

1）液泵动作正常，可靠；

2）水箱/液槽液位保护正常可靠（对于电火花成形机在不同位置各检若干次）；

3）液槽内的油温保护功能模拟检验（适于电火花成形机）；

4）液压管路无渗漏；

5）冲/抽液的压力调节（适于电火花成形机/小孔机/低速走丝线切割机）；

6）主轴头/导电块对地的绝缘；

7）接触感知及解除；

8）断丝的检测/丝筒保护与互锁动作（适于线切割机）；

9）水阻检测功能（适于低速走丝线切割机）；

10）去离子电路检查（适于低速走丝线切割机）；

11）机床的掉电保护功能；

12）主轴的负重运行（适于电火花成形机）；

13）放电加工中加工条件的改变；

14）负极性加工测试（适于电火花成形机）；

15）电容加工测试。

2.5　机床定位精度检验

根据各类别机床的精度标准，检验机床的定位精度（详见第4章）。

2.6　机床工作精度检验

除了相应的国家、行业标准规定的工作精度检验项目外，企业还可在自己的企业标准中增加若干内部控制项目，举例如下。

1）电火花成形机　最大加工电流/去除率（监控电柜/加工液的温升)；最佳粗糙度；三合一指标。

2）电火花小孔机　加工时间/电极损耗；加工孔的垂直度。

3）高速走丝线切割机　最大去除率；锥度切割。

4）低速走丝线切割机　切圆偏差/拐角偏差；多次切割的精度/粗糙度；大电流切割/去除率（监控电柜/加工液的温升)。

2.7　检验文件归档

例如：

1）主机配置表　有可能变更的重要零部件，如滚珠丝杠/直线滚动导轨/电机/编码器/泵的型号规格；

2）关键/重要加工件的检验记录；

3）螺距补偿记录；

4）几何精度/总装性能/定位精度/加工精度检验记录及检定报告；

5）速度常数设置记录；

6）部装性能检验记录；

7）现场问题记录。

编写：章国荣（北京阿奇夏米尔工业电子有限公司）



第3章　电解加工机床的质量控制

电解加工机床的性能、规格与欲加工产品的特殊要求密切相关，故机床的通用性较差，一般均是根据用户订货专门制造，多为单件或极小批量生产。另外，电解加工需要较大的电流，电解液有较强的腐蚀性，因而与其他的特种加工机床不同，其质量控制管理措施有诸多特殊性。

电解加工机床包括机床本体、整流电源、电解液系统三个主要实体以及相应的控制系统，而加工工艺是决定加工质量的最重要的技术因素。

1　机床本体的质量控制

电解加工机床本体包括床身、工作箱、主轴头、进给系统和导电系统。由于在加工过程中，工具阴极和工件之间要通过压力高达数兆帕的电解液，可产生数吨的液压反力。此外，通常采用的电解液对于金属有较强的腐蚀性。因此，电解加工机床本身最重要的力学性能是其刚性和耐腐蚀性。而在运动特性方面，主轴头工作进给速度的稳定性也会直接影响工件加工质量。所以，刚性、耐腐蚀性和进给速度的稳定性是电解加工机床本体质量控制的关键。

1.1　床身

床身是电解加工机床本体的基础部件，要支撑各种功能部件，刚性和装配精度是床身质量控制的两项关键指标。

1.1.1　床身刚性的控制

为加强床身的刚性，应科学设置总体布局。尽量减少机床主轴头和工作台面的相对运动环节，主轴头支架和工作台以固定式为佳。工具阴极和工件的相对位置的调整最好由辅助阴极板及辅助工作台完成。应尽量加大连接面的接触刚性，接触面要大并且尽量少挖空。夹紧力也应足够大。

（1）床身刚性的控制措施

1）卧式机床承受的载荷较大，床身应选用箱型结构，并设置大尺寸的纵向通筋，以确保高纵向刚性，减少受轴向载荷后的翘曲变形。在变形最大的中段，应重点布置加强筋以增大截面惯性矩，并加地脚螺栓固定。

2）大型立式机床床身由底座、立柱和横梁三部分组成框型结构。1万安培以上的设备，可用加预应力的大拉杆，将框架各部分联成整体。方法是：装配前将拉杆预热，装配后拉杆冷收缩而受拉伸预应力。这样就可以防止框架承载后三部分分离，保证较好的接触刚性。

3）中小型立式机床常采用C型床身，其刚性较弱。生产中应保证较大的立柱截面尺寸，也可以在床身开挡处加拉杆以减少受轴向力后床身立柱的弯曲变形。

4）单件或小批量生产的机床，多采用焊接结构的床身，其刚度质量比相对较大。

5）铸造结构床身，必须保证一定的截面尺寸，并合理配置加强筋。

（2）床身刚性的控制指标

1）轴向刚度　主轴头伸出的最大行程，根据机床的额定电流，按照5 N/1 A的比值，沿中心位置施加正向力，主轴头轴向变形位移≤0.20 mm。

2）侧向刚度　主轴头伸出的最大行程，根据机床的额定电流，按照5 N/1 A的比值，沿偏心 $e=1/4L$（滑枕宽度尺寸）施加正向力，主轴头侧向变形位移≤0.10 mm。

1.1.2　床身装配精度的控制

为保证床身的装配精度，需控制床身各安装基面（工作台、阴极安装板、导轨座）间的形位公差≤0.025 mm/300 mm。

1.2　工作箱

工件的电解加工是在工作箱中完成的。为保证电解加工的正常进行，一方面要向工作箱内引入加工电压和电解液，另一方面需将加工过程中产生的电解产物、热量和有害气体安全排出。因此可以说，工作箱是电解加工机床中最集中反映电解加工设备特殊性能的一个部件，其质量控制要求也与金属切削机床有很大区别。

工作箱部件主要包括工作箱体与工作台。

1.2.1　工作箱体

工作箱体需直接与电解液接触，必须用耐腐蚀材料制造，同时应注意保证密封和减少电化学腐蚀。

（1）工作箱体的结构

1）对于大型机床，宜采用不锈钢板焊接式结构。需严格控制冲压和焊接工艺，以保证密封处的质量。清理焊缝时必须采用与基体材料相同的刷子，以减轻焊缝处的电化学腐蚀。

2）对于中型机床，可采用整体玻璃钢薄壳式结构。制造过程中首先要保证木模的精度，其次在涂覆环氧树脂和粘接玻璃布时，必须严格按粘接工艺进行。

3）对于小型机床，可采用玻璃钢板拼装式结构。在设计和制造中要注意减少工作温度高时的箱体变形，并严格控制装配精度，防止电解液及腐蚀性气体的泄漏。

（2）工作箱体的密封

1）滑枕深入开口处的密封　为保证滑枕与工作箱相对运动的密封，通常将二者用由橡胶摺叠制成的皮老虎相连。要根据滑枕的运动行程，合理配置皮老虎的摺叠层数。

2）箱门处的密封　一般用橡胶条压紧密封。为保证密封可靠，一要选择软硬适中的橡胶条；二要保证各点的变形均匀，变形量在3~8 mm之间。

3）活动箱体与固定箱门之间的密封　既可以用橡胶条密封，也可以用迷宫密封。

（3）工作箱体的绝缘

1）机床与工具阴极可以设计成电气连通，也可以设计成互相绝缘。

2）机床与工件之间应可靠绝缘。

1.2.2　工作台

工作台由于直接与电解液接触，必须用耐腐蚀材料制造。早期采用不锈钢制造，现在已被性能更佳的花岗石所取代。其质量控制要点如下。

1）尺寸精度　平面度及各基准面间的平行度和垂直度均应控制在0.02 mm/300 mm以内。

2）强度　外廓尺寸应保证较大的厚度面积比；安装的底平面禁止挖空；禁止在其上直接加工螺纹孔、定位销孔或槽，而应镶嵌预先加工好孔、槽的不锈钢块。

3）移动工作台的导轨，以自润滑塑料贴面为佳。

1.3　主轴头

主轴头由滑枕、导轨、阴极安装板三部分组成。

一方面主轴头的结构与机床的总体布局是决定机床刚性

和加工精度的两个重要因素；另一方面，主轴头的结构与进给系统又是决定工具阴极平稳进给的两个关键。因此，主轴头的质量控制，是电解加工机床质量控制的重点。

1.3.1 滑枕

滑枕的结构类型主要有箱形、翅形和方形3种，分别适应于重型机床（10 000 A以上）、中型机床（2 000 ~ 10 000 A）和轻形机床（打孔套料机床）。

滑枕必须拥有较大的壁厚和截面积，并且要加载一定的预应力，以保证足够的刚度、减少加工过程中的变形。

1.3.2 导轨

目前，在电解加工机床上采用的导轨结构类型主要有以下4种。

1）静压导轨　摩擦因数小，耐蚀性强，刚性较好，但结构复杂，应限制使用。

2）滚柱导轨　摩擦因数小，但承载能力较小，导轨较长而行程较短。故控制应用在小型机床和小孔机床、电解磨床等。

3）滚动体组件——镶钢导轨　刚性强，精度高，进给平稳应用广泛。质量控制的关键如下。

① 使用前预加负荷，以消除导轨接触面上的间隙（负间隙）而仍保持滚动摩擦。预加负荷值为额定动负荷的20%。为确保预应力准确、均匀，应采用扭力扳手加力。

② 手油泵打润滑脂，或定时自动打润滑油，以保持极小的滚动摩擦因数（<0.005）。

③ 镶钢导轨采用淬硬工具钢（HRC68），用精密导轨磨床磨削。

4）自润滑塑料贴面导轨　将以PTEE为基的塑料导轨软带粘贴在导轨表面，摩擦力小（摩擦因数小于0.04），运行平稳，支承刚性好，精度高，且耐腐蚀，制造、使用简单。由于塑料导轨软带的硬度较金属低得多，磨损主要在软带上，维修时只需要更换新的软带，同时也彻底避免了导轨中凹。这种导轨近年来应用越来越广泛，其质量控制的关键是：

① 严格按贴面工艺，保证塑料导轨软带与导轨粘贴可靠；

② 塑料导轨软带粘贴在导轨副的短导轨上；

③ 使用前预加负荷；

④ 手油泵打润滑脂，或定时自动打润滑油润滑；

⑤ 导轨面的形位公差要控制在0.01 mm/全长以内。

1.3.3 阴极安装板

阴极安装板是主轴头与阴极之间的过渡件，其要求是：

1）阴极安装板需要与电解液接触，必须用耐腐蚀材料制造；

2）阴极安装板与主轴头底部安装面的形位公差要控制在$\leqslant 0.25$ mm/300 mm；

3）用于安装阴极（或水套、工装）的基面的形位公差要控制在$\leqslant 0.25$ mm/300 mm。

1.4 进给系统

根据拖动和传动方式的不同，电解加工机床的进给系统可分为液电类、机电类和机液混合类3种类型。

进给系统的质量，关键在于其进给速度的变化量和进给速度调节范围的控制。

1.4.1 进给速度的变化量（工作进给刚性）的控制

1）进给灵敏度、分辨率控制　位置分辨率应高于0.01 mm，速度分辨率应高于0.01 mm/min。

2）低速进给的稳定性好，没有爬行，漂移量$\leqslant 0.01$ mm。

3）速度特性硬　空载到满载的速度变化量应$\leqslant 0.25$ mm/min。

4）对于双头机床，两个主轴头同步进给的精度应高于0.01 mm。

1.4.2 进给速度调节范围的控制

电解加工工艺要求的进给速度调节范围极宽，具体指标如下。

1）工作进给速度　最低速度要$\leqslant 0.07$ mm/min，最高速度要$\geqslant 15$ mm/min。

2）快速进给速度　为缩短辅助时间，快速进给速度必须$\geqslant 300$ mm/min。

1.5 导电系统

1.5.1 系统发热和线路压降

1）应尽量选择电阻小且耐腐蚀的导电材料，常用的有紫铜、黄铜和不锈钢。其中紫铜的电阻率最小；黄铜次之，为紫铜的4倍；不锈钢电阻率最大，为紫铜的40倍。

2）根据额定电流合理选择导电截面积，以控制电流密度。要保证电流密度不超过160 A/cm^2（紫铜）、40 A/cm^2（黄铜）和4 A/cm^2（不锈钢）。如果导电件通有冷却水，则选取的电流密度可比上述值高得多。

3）为减少接触电阻，导电件的接触面必须修磨平整，最好能镀银或镀锡，还要用螺钉连接牢固。

4）为了减少脉冲电流传输失真和衰减，要尽量减少回路的寄生电感。必须采用低电感传输线，在线路布局时应缩短回路，所包含的面积应尽量小。

1.5.2 导电系数尤其是阳极传导系数的电化学杂散腐蚀

1）要尽量将电缆线直接由汇流排连接到工具阴极和工件上，而不通过阴极安装板和工作台传导电流。

2）固定在工作箱体上的阳极汇流排，必须与工作箱体可靠绝缘，要保持较大空间距离，并且应设置障碍物阻止电解液在两者之间形成回路。

1.6 机床总体形位公差的控制

机床各部件制造完毕，就进入装配阶段。装配过程中要保证机床的总体形位公差，这也是机床总体质量控制的关键。一般情况下，电解加工机床的总体形位公差应控制在下列水平：

1）工作台与阴极安装板之间的平行度$\leqslant 0.02$ mm/100 mm；

2）导轨面与阴极安装板的垂直度$\leqslant 0.018$ mm/100 mm；

3）导轨面与工作台的垂直度$\leqslant 0.018$ mm/100 m。

总体形位公差控制方法，对于卧式机床，主要措施是在装配过程中修整床身与阴极安装板、工作台之间的安装基面；对于立式机床，还可以调整底座与横梁之间的连接立柱。

2 电源的质量控制

电解加工机床电源（以下简称电源）的性能（波形、电压、稳压精度和短路保护性能等）直接影响电解加工的阳极溶解过程，从而影响电解加工的精度、表面质量、稳定性和经济性。

2.1 输出参数

1）额定电流　电源的额定电流是确定电源规格的关键参数，它也将决定机床和电解液系统的规格。电源的额定电流必须保证能按所要求的速度加工所设计的最大加工面积的工件。其估算公式为：

$$I = KS_{\max} i_{\max} \tag{7.3-1}$$

式中，I 为额定电流，A；S_{max} 为设备最大加工面积，cm^2；i_{max} 为最大加工电流密度，A/cm^2；K 为电源使用裕度，控制取值范围在 1.5～2.0。

2）额定电压　通用电源的额定电压应在 8～24 V 范围内连续可调。

2.2　稳压性能

在下述 3 种条件下，输出电压变化量的控制范围应≤±1%：

1）电网电压波动±10%；

2）电网交流频率波动±5%；

3）负载变化 0～100%。

2.3　快速短路保护系统

快速短路保护系统是由电解加工工艺引发而来，且为电解加工电源所特有的装置。它不仅保护电源自身，而且还要保护工具阴极和工件在短路时烧伤程度最小。配备快速短路保护系统，是保证电解加工质量稳定的重要环节。

2.3.1　短路保护系统应满足的技术要求

1）在产生火花或短路时，工具阴极及工件表面没有明显的损伤；在排除故障重新接续加工后，工件表面不留痕迹。

2）具有较强的抗干扰能力，不受非短路信号的干扰而误动作，例如来自电解加工设备自身的干扰（大电流通断如 SCR、MOSFET 等功率开关器件以及接触器的通断等）以及周围设备的干扰（天车、焊机及日光灯等）。

2.3.2　短路保护系统的组成与控制技术

为满足上述要求，短路保护系统必须包括短路信息检测及快速切断装置两部分。

（1）短路信息检测线路应具备的控制功能

1）能较全面采样出短路前发生的异常情况所产生的预兆信号。表 7.3-1 为检测信号及其控制指标列表。

表 7.3-1　检测信号及其控制指标

项目	检测信号	控制指标	异常状态
1	工作电流超过最大电流极限	稍大于实际工作电流值	1）加工参数选择不当，加工间隙过小 2）机床或主轴刚性差或主轴爬行产生突然的短路，而其他短路预报信号未起作用
2	工作电流增长率过大	每秒变化超过 1%～20%	1）间隙中混入导电杂质，引起电弧放电 2）加工参数选择不当，间隙突然减小 3）钝化膜被破坏，形成大能量击穿层
3	工作电流下降率过大	每秒变化超过 4%～30%	1）混入非导电杂质或堆积氢氧化物和氢气 2）局部地区产生空穴 3）加工表面生成局部钝化膜
4	工作电压的高频振荡	700～1 400 Hz	1）火花放电 2）混入导电杂质 3）阴极与工件接触
5	极间直接短路		1）阴极与工件接触 2）混入导电杂质构成间隙短路桥
6	电压下降率过大	瞬时电压下降时间为 10 μs	1）间隙过小，短路前形成小能量击穿层 2）间隙突变

2）能根据加工条件预置各种预兆信号的给定值。

3）能调整检测回路的灵敏度（时间常数），避免短路系统误动作。

4）能将各种非短路预兆信号的误信号分离出去，即具有鉴别真假短路信号的能力。

（2）快速切断装置应具备的主要控制功能

1）应快速熄灭前期的火花和拉弧，或切断电源并将间隙中由电容和电感存储的残留电能转移出去。作用时间应控制在微秒级内。

2）当采用外加的快速切断装置时，要保证其执行元件（如大容量快速可控硅以及快速保险）的可靠性。

2.4　可靠性控制

为保证电源在加工过程中可靠工作，需控制以下几点。

1）电源柜应耐腐蚀。除变压器外，其余部分应密封在一个柜内，柜内须保证不发生凝露现象。加工电源具有独立的柜体，或者在电气柜内但与其他设备隔离时，其防护等级≥IP22。否则，其防护等级≥IP54。

2）在下列条件下，电源应稳定、可靠、无故障：满负荷下连续工作 30 min 以上；停机 15 min 再以同样条件循环工作；三班制连续运转。

3）应有双重的过电流保护措施。发生短路时，电源自身必须在 10 ms 内切断供电，其元件须无损伤。

4）短路保护系统的抗干扰能力强，不受电解加工设备自身以及周围设备的非短路信号的干扰。

3　电解液系统的质量控制

电解液系统对电解加工的稳定性及加工重复精度的影响很大，不容忽视。

3.1　电解液系统的组成

电解液系统主要由以下几部分组成。

1）输液系统　包括泵、阀、管道、过滤器、电解液槽等。

2）热交换系统　包括加热器和冷却器，或热交换器。

3）净化系统　包括净化设备及其输液装置。

3.2　输液系统

输液系统中，泵、阀均为外购定型产品，不再详述。

（1）过滤器

1）应采用卡套式滤芯，便于更换及清洗。

2）过滤元件多用不锈钢网、铜丝网或尼龙丝网，须根据加工间隙严格控制网孔尺寸。

（2）管道

1）管道材料应为耐腐蚀金属管，只有在压力不高处（连接热交换器、净化设备等）才可用软管。

2）管径尺寸可按泵接口直径选配，也可按流速计算。管内流速应不低于能带起产物的临界速度，也不能高于 10～12 m/s，通常按流速 3～5 m/s 选取管径。

（3）电解液槽

1）材料选择　容量在 10 m^3 以上时，用耐蚀水泥制成池式槽。容量较小时，可制成箱式槽，结构及材料有以下几类：不锈钢板焊接；聚氯乙烯板焊接；普通钢板焊接，内衬橡胶；薄壳整体玻璃钢式。

2）容量控制　电解液槽的容量取决于机床的产物生成速度、对电解液清洁程度的要求、冷却系统的效率以及电解液输送的流量。配备连续净化和冷却系统的电解液槽的最小容量，可参照表 7.3-2。

表 7.3-2 电解液槽的最小容量

电流/A	5 000	5 000	5 000	10 000	10 000	10 000
电压/V	12	18	24	12	18	24
电解液槽容量/m^3	1.0～1.5	1.5～1.7	2.0～2.5	2.0～2.5	3.0～4.0	5.0～6.0

对于不连续净化的电解液槽，其容量应为上表中数值的2～3倍。此时，不进行净化的最大连续工作时间应控制在：

$$t=\frac{1\,000\,CV}{W} \qquad (7.3\text{-}2)$$

式中，t 为最大连续工作时间，h；C 为容许极限产物含量，kg/m^3；V 为电解液槽容量，m^3；W 为机床的加工产物生成速度，g/h。

3.3 热交换系统

热交换系统由热交换器和温度自动调节系统组成。

国外的电解加工机床大多具有与机床配套设计制造的专用热交换器，其使用效果较好，但成本很高。根据国内情况，可以选用石油或化工行业所用的产品。

热交换器的质量控制措施如下：

1）必须选用耐腐蚀材料制造；

2）结构上要便于清洗（电解产物的沉淀）；

3）为保证温度控制在给定的范围内，热交换器须保证足够大的热交换面积。设热交换温差为20℃，所需热交换面积参见表 7.3-3。

表 7.3-3 热交换面积

电源		热交换器散热量/W	热交换面积/m^2	
电流/A	电压/V		管式单流	组合板式
2 500	12	32 500	5.5～7	3～4
5 000	12	70 000	12～15	6～8
10 000	12	150 000	26～33	10～15
10 000	24	325 000	55～70	30～40

3.4 净化系统

除了自然沉淀净化法以外，可用于电解加工的净化设备主要有下列几种：周期作用离心分离机、连续作用离心分离机、连续作用真空吸滤机、连续作用压滤机、连续作用板式沉淀箱。几种净化设备性能的比较见表 7.3-4。

表 7.3-4 净化设备性能比较

设备 \ 性能	沉淀			过滤	
	离心力		重力		
	周期作用离心机	连续作用离心机	板式沉淀箱	吸滤机	压滤机
运行方便性	中	好	好	中	好
自动化性能	差	好	中	好	好
噪声	中	差	好	中	好
卸渣最小含水量	中	中	差	好	好
处理后含渣量/$g\cdot L^{-1}$	2～3	1～2	0.1～0.3	3～4	0.1～0.3

由上表可见，选用压滤机作为电解加工的净化设备较佳。

4 控制系统的质量控制

电解加工机床控制系统的总体要求，原则上应符合 GB/T 5226.1—2002 标准中相关的要求。除此以外，控制柜应耐腐蚀，柜体应密封可靠，柜内须保证不发生凝露现象。其防护等级不得低于 IP54。电解加工控制系统的内容必须包括参数控制、循环控制、保护和联锁三个部分，下面分别介绍。

4.1 参数控制系统

参数控制系统是电解加工控制系统的核心环节。它的功能决定于电解加工工艺的要求和工艺的特点，集中反映了电解加工工艺的特殊性。参数控制系统的核心要求是控制极间加工间隙，使其保持恒定的预选数值或按给定的函数变化。

由于加工间隙处于电场和流场的作用下，是时间和空间的变化函数，且空间极小，因而在加工过程中实时测量非常困难，特别是对于三维空间的间隙，至今尚无成熟的采样方案。当前，在国内外生产中均采用间接控制法，即通过控制影响间隙的主要参数来控制间隙。控制方式可分为恒参数控制和自适应控制两种。

4.1.1 恒参数控制

恒参数控制是指分别控制电压、进给速度（或加工电流）、电解液浓度、温度、压力（或流量）等参数的恒定来保证加工间隙恒定。恒参数控制的关键，是保证各参数的控制精度达到 ±1%。

4.1.2 自适应控制

自适应控制是指通过控制系统使某些参数之间按照一定的规律变化，以互相抵消这些参数分别引起的加工间隙的变化。自适应控制的关键是：

1）参数的准确测量和采样；

2）根据各参数之间的变化规律，建立科学的数学模型。

4.2 循环控制系统

循环控制是指按照既定的程序控制机床、电源、电解液系统的动作，使之相互协调，均按工具阴极进给的位置（深度）转换加电、供液点及改变进给速度等。

循环控制系统可分为以下几类。

1）继电系统　用行程开关预给定的程序转换位置。

2）简易数控系统　用数字拨码盘开关预置的程序转换位置，并配置位置数字显示；或用逻辑门及灵敏继电器组合出要求的动作顺序。

3）微机控制系统　用单板机或微型计算机的软件控制加工程序。

4）可编程序控制器系统　根据所要求的控制功能，用标准模块组合而成。

4.3 保护和联锁系统

除了一般机床自动控制系统所具有的保护和联锁功能以外，电解加工机床还必须具有下列特殊功能。

1）为确保加工中产生的有害气体和电解液水雾有效排出，机床应采取强制排风措施，并且应配备缺风检测保护装置。

2）防止电解液飞溅而设置的工作箱门的联锁以及防止潮气进入而设置的电器柜门的联锁。

3）主轴头和电源柜内渗入潮气的报警。

4）防止工具阴极及工件短路烧伤的快速短路保护。

5 加工工艺的质量控制

电解加工机床的质量水平对电解加工的产品，或者说对电解加工的结果的质量有着重大的影响。然而电解加工的工艺对加工结果的质量同样具有重大的影响。虽然一切加工工艺对加工结果都有影响，其他电加工方式也如此，但是电解加工工艺对加工结果的影响特别重大，不同的工艺又对电解



加工机床提出不同的要求。因此有必要对电解加工工艺的质量控制作一介绍。

5.1　加工间隙及加工参数

加工间隙是电解加工的最核心工艺要素，它是决定加工精度的最主要因素，也直接影响加工效率和表面质量，同时还是设计工具阴极和选择加工参数的主要依据。

5.1.1　加工间隙的取值范围

加工间隙的取值范围，在不同加工条件下存在较大差别，具体数值可参见表 7.3-5、表 7.3-6。

表 7.3-5　不同电解加工方式的加工间隙取值范围

加工方式		间隙范围/mm
直流电流	线性电解液	0.2～0.5
	非线性电解液，或混气电解液	0.1～0.2
脉冲电流	连续进给	0.03～0.1
	振动进给	0～0.05
	周期进给	0～0.05

表 7.3-6　不同工序的加工间隙取值范围

工序种类	间隙值/mm	
	极限范围	常用范围
孔及型腔加工：		
小孔（直径≤8 mm）	0.02～0.3	0.1～0.2
小型腔（型面长度 3～40 mm）	0.08～0.3	0.15～0.3
大型腔（型面长度＞40 mm）	0.3～1.0	0.3～0.5
叶片型面加工：		
叶型长度≤100 mm	0.08～0.3	0.2～0.25
100～200 mm	0.15～0.5	0.25～0.3
200～300 mm	0.3～0.8	0.3～0.5
电解车：		
预钻通孔（直径＜10 mm）	0.2～0.3	0.2
外表面	0.2～0.8	0.3～0.5
电解磨：		
金属阴极	0.1～0.8	0.2～0.3
导电磨轮	0.01～0.08	0.02
电解切割：		
盘形阴极（直径＜100 mm）	0.1～0.5	0.2～0.3
线电极（厚度≤30 mm）	0.1～0.6	0.2～0.3

5.1.2　加工间隙的影响因素与控制

加工间隙受电场、流场及电化学特性三方面的多种复杂因素的影响，控制难度很大。影响因素包括：

1）工件的材料、形状和面积；

2）工具阴极的形状及通道；

3）电解液的成分、浓度、温度、流量、压力、气泡率、流动方式等；

4）电源的电流模式、加工电压、加工电流；

5）主轴头的进给方式及进给速度。

加工间隙的控制，实质上是对影响加工间隙的各种加工参数的控制。

（1）加工参数的确定顺序

加工参数的确定顺序是先选定加工间隙（见表 7.3-5 和表 7.3-6）、进给速度（见表 7.3-7），然后确定电流密度，最后再选定相应的加工电压及电解液参数。

表 7.3-7　进给速度的取值范围

加工对象	进给速度 /mm·min⁻¹	加工对象	进给速度 /mm·min⁻¹
大尺寸型面、型腔	0.15～0.8	大中尺寸孔、套料	1.5～5
中小型面、型腔	0.3～2.5	小尺寸孔、套料	2.5～10

（2）加工参数的优选原则

加工参数的优选，要根据加工的要求以及工件的特点而定，以获得符合质量技术要求的加工效果。

1）对于以加工效率为主要要求的尺寸加工或以降低表面粗糙度为主要要求的抛光加工，一般应采用高参数、大间隙的加工，即较高的进给速度、电流密度、加工电压和电解液流量，相应地要求设备的容量大（额定电流大，电源电压较高，泵流量较大），但设备精度和刚性及电解液净化程度均适中即可。

2）对于以加工精度为主要要求的精密加工以及套料、孔加工，应采用高参数（较高的进给速度、电流密度）、小间隙加工，同时还要求较高的电解液压力，但加工电压及电解液流量则较低。

3）微秒级脉冲电流电解精密加工应采用高参数、小间隙，但电解液压力和流量适中即可。

4）采用非线性电解液及混气电解液加工时，应选用低参数、小间隙加工，即较低的进给速度、电流密度、电解液流量，但加工电压须较高，前者是由于较高的阳极超电位，后者是由于较高的间隙欧姆压降。

5）对于特大型面积的工件加工，限于电源容量（目前国内最大电源为 20 000 A，国外为 40 000 A），只能采用低参数加工。

6）采用低浓度电解液加工时，由于电导率较低，也只能采用低参数加工。

7）对于小间隙加工，特别是高参数、小间隙加工，必须配备相应的高性能设备，即刚性好，进给速度稳定性高，机床精度高，电解液净化程度高，自动控制系统功能完善，电源容量大。

5.2　电解液

5.2.1　电解液技术要求

电解加工中对电解液的要求是多方面的，难于找到一种电解液能满足所有的要求，因而需要有针对性地根据被加工材料的特性及主要加工要求，有所侧重地选择某种电解液。对粗加工，电解液的选择侧重于解决加工效率问题；对精加工，则是侧重于解决加工精度和表面质量问题。例如高温合金叶片侧重确保加工精度，而钛合金叶片则是侧重于解决表面质量。因而在电解液优选中，除共性的原则外还有针对不同情况的特殊的优选原则。以下按优选电解液的 3 个主要方面进行论述。

（1）电解液类型的优选

1）绝大多数加工中优先考虑中性电解液。

2）碱性电解液只用于加工钨、钼等特殊材料。

3）酸性电解液只用于微孔、深细小孔，特别是电液束加工。

（2）电解液组分的优选

1）阴离子的优选　电解液组分中影响阳极溶解特性的主要是阴离子，在中性电解液中能满足上述要求的常用电解液主要有两类。

① 卤素族盐　卤素族盐为活性电解液，其阴离子主要起活化阳极表面作用，活化能力的顺序为 $Cl^- > Br^- > I^- > F^-$。Cl^- 可使阳极表面完全活化，达到高电流密度、高电流效率，因而 NaCl 电解液在要求效率为主的加工中广为采用。

在钛合金电解加工中，由于钛的自钝化能力强，因而也必须采用活化性强的卤素族盐，其中以 Br^- 和 I^- 击穿钛自钝化膜能力最强，在一般浓度、温度、电压下均是如此，而 Cl^- 则只有在高浓度、较高的温度、较高电压下才能有较强的击穿能力，因而 NaBr、KBr 为佳。

② 含氧酸盐　含氧酸盐属氧化剂，与卤素盐相反，为钝性电解液，对阳极表面起氧化/钝化作用，对马氏体不锈钢及铁基合金钝化作用最强，提高了其超钝化电位，同时还降低了析氧电位，在低电流密度下大量析氧，因而非线性效果显著。但含氧酸盐对镍、铬合金、钛合金等抗氧化能力强的金属，钝化作用较弱，低电流密度下析氧甚微，因而在直流加工非线性效果就不明显。但仍能生成可溶性保护膜，改善了阳极溶解的均匀性，从而改善表面质量。

2）组分的优选　实践表明，活性组分与钝性组分搭配的复合电解液其活性和钝性的阴离子具有相互补偿的作用。根据不同加工材料的特性以及不同的加工要求，优选出不同的比例，可以达到电解加工所希望的均匀活化溶解或均匀超钝化溶解状态，从而改善表面质量或提高加工精度。调整其比例还可以变化其活性和钝性的强度，得到不同的阳极溶解特性和加工效果，满足不同的需要。

（3）电解液浓度的优选

在选定电解液的类型、组分后，电解液浓度就是要优选的重要参数，它是影响前述电解液性能的基本因素之一。

为达到高的加工效率，早期电解加工电解液浓度均偏高，从总体看来其加工精度较差，对某些合金例如钛合金、铸造耐热合金，其加工表面质量亦不理想。为解决这些问题，近年发展了低浓度复合电解液，突出的效果体现在加工钛合金时活化能力强，活化时间较短，能较快地击穿钛合金电解中强的自钝化膜，快速达到均匀溶解，从而得到均匀、光滑的加工表面。其缺点是加工效率较低。低浓度复合电解液对铸造耐热合金亦有类似效果。另一方面体现在加工马氏体不锈钢、模具钢及铁基合金时非线性效果显著，对不同材料在相应的最佳组分、最佳搭配时，饱和 η 也较高，因而在提高加工精度的同时，仍能得到较高的加工效率。

综上所述对钛合金及铁基合金的精密加工，应优选低浓度复合电解液。

5.2.2　常用电解液

当前生产中常用的电解液为 NaCl、$NaNO_3$ 及 $NaClO_3$ 三种，在复合电解液中也以此三种的相互复合居多。三种电解液的性能、特点及应用范围见表 7.3-8。

表 7.3-8　三种电解液的性能、特点

项　目	NaCl	$NaNO_3$	$NaClO_3$
常用质量浓度	250 g/L 以内	400 g/L 以内	450 g/L 以内
表面粗糙度	与电流密度、流速及加工材料有关，一般为 R_a0.8 ~ 6.3 μm	在同样条件下低于 NaCl 电解液	低于 NaCl 和 $NaNO_3$ 电解液
加工精度	较低	较高	高
表面质量	加工镍基合金易产生晶界腐蚀，加工钛合金易产生点蚀坑	一般不产生晶界腐蚀，但电流密度低时也会产生点蚀	杂散腐蚀最小，一般也不会产生点蚀，已加工面耐蚀性较好
腐蚀性	强	较弱	弱
安全性	安全、无毒	助燃（氧化剂）	助燃（强氧化剂）
稳定性	加工过程较稳定，组分及性能基本不变	加工过程 pH 值缓慢增加，应定时调整使之≤9	加工过程缓慢分解，Cl^- 增加，ClO_3^- 减少，故加工一段时间后要适当补充电解质
相对成本	NaCl：$NaNO_3$：$NaClO_3$ = 2：5：12		
应用范围	精度要求不高的铁基、镍基、钴基合金等，应用范围最广	精度要求较高的铁基、镍基、钴基合金，有色金属	加工精度要求较高的零件；固定阴极加工

从表 7.3-8 可以看出：NaCl 电解液的优点是高效、稳定、成本低、通用性好，因而早期得到普遍应用，其缺点是加工精度不够高，对设备腐蚀性较大；$NaNO_3$ 电解液优点是加工精度较高、对设备腐蚀性较小，应用面亦较宽，缺点是加工效率较低；$NaClO_3$ 电解液虽然加工精度高，在使用初期发展较快，但成本较高，使用过程较复杂，干燥状态易燃，因而须控制应用。

5.2.3　常用材料电解液选择

如前所述，电解液必须与加工材料配对选用，且与加工条件、加工要求有关，因此应根据具体情况选定。表 7.3-9 列举了一些应用较多的但并非唯一的配方，以供使用者选用时参考。

表 7.3-9　常用材料电解液配方

加工材料	电解液配方示例	加工材料	电解液配方示例
碳素结构钢 低合金钢	NaCl 的质量分数 7% ~ 18%（最高可用到 25%） $NaNO_3$ 的质量分数 20% ~ 30%（最高可用到 40%） $NaNO_3$ 的质量分数 20% + $NaClO_3$ 的质量分数 3% ~ 10%	模具钢 铁基合金	$NaNO_3$ 的质量分数 20% ~ 30% NaCl 的质量分数 7% ~ 18%
		奥氏体不锈钢	$NaNO_3$ 的质量分数 10% + NaCl 的质量分数 10%
马氏体不锈钢	$NaNO_3$ 的质量分数 10% + NaCl 的质量分数 10%	镍基合金 钴基合金	$NaNO_3$ 的质量分数 20% ~ 40%（精加工可用到 7%） NaCl 的质量分数 18% ~ 25%
模具钢 铁基合金	$NaNO_3$ 的质量分数 4% + $NaClO_3$ 的质量分数 2% + Na_2SO_4（2Cr13）的质量分数 2% $NaNO_3$ 的质量分数 6% + Na_2SO_4（5CrNiMo）的质量分数 2% $NaNO_3$ 的质量分数 4% + Na_2SO_4（3Cr2W8V）的质量分数 2%	铸造高温合金	NaCl 的质量分数 3.5% ~ 7% NaCl 的质量分数 3.5% + NaF 的质量分数 0.3% NaCl 的质量分数 3.5% + NaF 的质量分数 0.3% + $K_3C_6H_5O_7$ 的质量分数 5%
	$NaNO_3$ 的质量分数 4% ~ 5% + Na_2SO_4 的质量分数 2%	钛合金	$NaNO_3$ 的质量分数 6% + NaCl 的质量分数 2%



续表 7.3-9

加工材料	电解液配方示例	加工材料	电解液配方示例
钛合金	NaBr 的质量分数 4% + NaCl 的质量分数 4% $NaClO_3$ 的质量分数 5% + NaCl 的质量分数 3% $NaNO_3$ 的质量分数 1.6% + NaCl 的质量分数 5% NaBr 的质量分数 10% + NaCl 的质量分数 10% $NaNO_3$ 的质量分数 12% ~ 25% + NaCl 的质量分数 4% ~ 8% $NaClO_3$ 的质量分数 15% + NaCl 的质量分数 6% ~ 8% NaCl 的质量分数 12% ~ 18%	铝合金	$NaNO_3$（锻铝）的质量分数 15% ~ 20% $NaNO_3$（铸铝）的质量分数 10%
		铜合金	$NaNO_3$ 的质量分数 30% $NaNO_3$ 的质量分数 20% ~ 25% + NaCl 的质量分数 3% ~ 5%
		硬质合金	NaOH 的质量分数 8% ~ 16% + NaCl 的质量分数 2% + $H_2C_4H_4O_5$ 的质量分数 8% ~ 16% + CrO_3 的质量分数 0.2% ~ 0.5%

注：1. 镍、钴基高温合金易产生晶界腐蚀，故采用含氧酸盐居多，采用含氧酸盐与氯盐的复合电解液综合性能较好。
2. 钛合金型面、型腔加工时选用低浓度复合电解液为宜。打孔、套料则以高浓度为好。
3. 加工铝、铜合金时选用 $NaNO_3$ 电解液可降低表面粗糙度，故多用此种电解液。
4. 硬质合金的电解加工必须采用能使 WC 和 Co 都分别溶解的 NaCl 和 NaOH 复合电解液。
5. 粗加工时浓度应偏上限，精加工时则偏下限。

5.3 电解液流场

电解液流场与电场、电化学特性一起，构成决定间隙过程的三大要素，直接影响电解加工的精度、表面质量和加工效率。因此需要对电解液的流场加以控制。所谓的流场控制就是要保证流场的均匀性，它应包括选择合适的流动方式和最佳的流场参数。

5.3.1 流动方式的选择

根据各种流动方式的特点，可知其合适的应用范围。因此，须根据加工对象的不同，来选择电解液的流动方式。详见表 7.3-10。

表 7.3-10 电解液流动方式的选择

流动方式		主要应用范围
侧向流动		1）平面及型面加工，如叶片加工 2）浅型腔加工 3）流线型型腔加工，如叶片锻模加工
正向流动	不加背压	1）小孔加工 2）中等复杂程度型腔或加工精度要求不高的型腔 3）混气加工型腔
	加背压	1）复杂型腔 2）较精密的型腔
	毛坯有预孔	有预孔的零件加工，如电解镗孔等
反向流动		1）复杂型腔 2）较精密的型腔
静液		1）电解光整加工 2）电解去毛刺 3）电解打标记

5.3.2 流场参数的选取

（1）电解液流速的控制

保持合适速度的电解液从加工间隙中流过，是电解加工稳定进行的基本条件。控制电解液流速的原则，就是要满足下述两点主要功能要求。

1）保证适当高的流速，以便从加工间隙中带走电解产物和气体，同时令电解液流动处于有利于均匀流场并消除浓差极化的紊流状态。

2）选择适当高的流速以控制温升。最适宜的电解液温度为 35℃以下，通常应控制其不超过 45℃。

（2）电解液压力的确定

电解液的压力（通常指进口压力）能具有下述三方面的作用：提供电解液在加工间隙中流动的动能（动压）；克服加工间隙中的黏滞阻力；平衡加工间隙出口端的压力（背压）。

不同加工条件下，电解液流速、压力的取值范围（以电解液密度等于 1.1 g/cm³ 为例）见表 7.3-11。

表 7.3-11 电解液流速、压力规范

工序种类	流速 /m·s⁻¹	压力/0.1 MPa			
		动压	黏滞阻力	出口背压	进口压力
叶片型面	15 ~ 20	1.26 ~ 2.24	3.1 ~ 5.1	0 ~ 0.51	4.36 ~ 7.85
小孔、型腔、叶型套料	6 ~ 10	0.2 ~ 0.56	10.2 ~ 15.3	1.02 ~ 1.53	11.42 ~ 17.34

上表中数值是针对纯液相电解液的。如果考虑气、液两项流动特性，即考虑到由于气体的膨胀而使间隙中压力增加，则气泡率越大，压力增加越多，一般情况下其数值比纯液相的增加 10% ~ 15%。

除了要正确选择电解液流动方式和压力、流速外，还必须合理设计通液槽（孔），才能保证流场的均匀性。

5.4 工艺装备的质量控制

电解加工的工艺装备包括工具阴极和夹具两部分。

5.4.1 工艺装备的特殊技术要求

电解加工工艺装备直接接触腐蚀性介质，且承受较大的动负荷，并传输较大的电流和高速流动的电解液。工具阴极和工件是在小的动态变化的间隙下工作，易发生极间短路，而且工艺装备的定位精度又是确保工件加工精度的重要环节。因此在设计和制造工艺装备时，必须重点考虑如何防蚀，确保其定位的稳定性和正常地传导电流和输送电解液。此外，绝缘和密封也是必须解决的两大重要问题。

5.4.2 防腐性能的控制

（1）材料的选择

1）工具阴极材料的选择范围较宽，包括紫铜、黄铜、不锈钢、普通碳钢、铜钨合金和石墨。详见表 7.3-11。

表 7.3-11 工具阴极的材料

材料	紫铜、黄铜	不锈钢	普通碳钢	铜钨合金	石墨
适用阴极	孔加工、花键加工以及形状较复杂的加工	型腔、型面和小孔加工	孔加工及型腔加工，特别是大型工件加工	型孔、整体叶轮及机匣加工	型腔加工

2）在保证刚性的前提下，选用夹具材料时应尽量采用非金属材料，以防止杂散腐蚀或原电池电流腐蚀。

① 夹具本体材料必须有足够的强度和弹性模数以确保必要的刚度，因而普遍采用玻璃钢或铸造陶瓷。

② 定位件材料要求有足够的稳定性，耐磨性好，吸水性小，热膨胀系数低，硬度高，因而须采用陶瓷或高性能的玻璃钢（如进口绿色层压玻璃钢）。

③ 导引件如轴承、导轨等则要求摩擦因数低，可采用自润滑尼龙、塑料导轨软带等。

为确保夹具的刚性，某些部位须采用金属材料。常用的金属材料有不锈钢、黄铜、青铜、锡锌青铜以及莫尔合金，后两者性能较好。偶尔可用钛合金。必须注意不能选用可能产生晶界腐蚀的材料。

（2）防腐技术措施

为了防止工艺装备的化学腐蚀和电化学腐蚀（包括金属表面的杂散电流腐蚀以及在不同金属之间发生的原电池电流腐蚀），需采取以下措施。

1）工具阴极非工作面的防腐、绝缘

① 环氧塑料涂层。这种方法应用广泛。

② 浸涂与烧结高温陶瓷。主要用于小孔加工阴极的处理。

2）夹具的防腐　用半流体状的合成橡胶绝缘，或用聚氯乙烯板覆盖带阴电表面，特别是靠近夹具的带阳电的零部件处，以切断电场，限制杂散电流。

3）工件上非加工部位的防腐　采用牺牲阳极的办法保护工件上的非加工部位，特别是榫头定位基准面。可在被保护的阳极表面上覆盖一层电极电位更负的金属，使之先被腐蚀。也可采用双电源电压的方式，在榫头周围环绕一层金属片，在其上加以更高的电压，将电力线吸引到其上而先行腐蚀此保护层。

5.4.3　确保工艺装备稳定性的技术措施

1）刚性的控制　在某些特殊情况下产生的突变的负载可能引起系统的自激振荡，为避免其发生，工具阴极和夹具的刚度应高于仅考虑电解液压力计算所得的刚度。在实际的负载作用下，其变形应限制在 ±0.025 mm 以内。

2）材料稳定性的控制　金属材料特别是铸件及焊接件必须经过消除内应力的处理。

3）夹紧可靠性的控制。

5.4.4　导流和导电方式

（1）导流方式的确定

1）为确保电解液进出口处流场的均匀和稳定，工具阴极或夹具上必须有进、出口导流段。

2）根据电解液的流动方式选择合适的导流结构。正流式加工的导流段置于阴极本体内；反流式加工则要设计专门的水套，水套与阴极体共同构成进水的导流腔；侧流式的导流段置于夹具本体或阴极导向装置中。导流段应为流线型并有一定的长度，进液导流段应为收敛形；出液导流段如是自由流出则为扩散型，若要加背压也以收敛形为好。

3）夹具的阴极导引段与阴极滑动面之间的密封以及阴极与水套之间的密封均是影响流场的重要环节。根据不同的结构可选用 O 形密封圈、迷宫密封或小间隙密封。

（2）导电方式的确定

1）导电回路结构类型的选择

① 引入导线，将其导电接头直接压紧到工件及阴极的导电面上，导线可用汇流排、多股绞线、铜编织带或多层铜带，大电流则可用空心水冷电缆。这种类型导电回路的线路损失小，在工作箱内空间足够时，应尽量采用该方案。

② 电流通过工作台传输到夹具定位块上，通过阴极安装板传输到工具阴极上。这种类型的夹具结构较复杂，必须解决好防蚀、密封和发热问题。

2）导电质量控制

① 对于较长的或材料电导率较低的工具阴极和工件，应从两端引电以减少加工电压的损耗并使加工区电流密度均匀。

② 导电接头应减至最少，导电面积要足够大，更重要的是接触面应平整、光滑、清洁并保持足够的压紧程度，应达到接触面产生弹性变形。

③ 应在接触面上涂敷导电硅油、含银或铜粉的导电脂，以防止导电面的烧伤或化学腐蚀。

编写：陈远龙（合肥工业大学特种加工研究所）



第 4 章　电加工机床检测的一般要求

1　检测依据

电加工机床产品质量的现行国家标准和行业标准主要有：

GB 13567—1998　电火花加工机床　安全防护技术要求
GB/T 5290.1—2001　电火花成形机　参数　第 1 部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）
GB/T 5291.1—2001　电火花成形机　精度检验　第 1 部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）
JB/T 4105—1999　电火花成形机　技术条件
GB/T 7925—1987　电火花线切割机　参数
GB/T 7926—1987　电火花线切割机　精度
JB/T 10082—2000　电火花线切割机　技术条件
JB/T 5543—1991　数控低速走丝电火花线切割机　精度
JB/T 5544—1991　数控低速走丝电火花线切割机　技术条件
JB/T 5770—1991　立式电解成形机　参数
JB/T 5759—1991　立式电解成形机　精度
JB/T 5760—1991　立式电解成形机　技术条件
JB/T 6098—1992　电解加工机床　通用技术条件
JB/T 10329.2—2002　电熔爆外圆加工机床　第 2 部分：参数
JB/T 10329.3—2002　电熔爆外圆加工机床　第 3 部分：精度检验
JB/T 10329.4—2002　电熔爆外圆加工机床　第 4 部分：技术条件
JB/T 10330.1—2002　高速电火花小孔加工机　第 1 部分：技术条件

上述标准对电加工机床产品的质量要求做了规定。对于部分安全防护项目、测量方法等，这些标准通过引用其他标准，使引用标准所包含的条文成为上述标准的条文。例如，GB 13567—1998《电火花加工机床　安全防护技术要求》标准多处引用了 GB/T 5226.1—2002/ IEC60204—1：2000《机械安全　机械电气设备　第 1 部分：通用技术条件》标准及 GB/T 16769—1997《金属切削机床噪声声压级的测量》标准等。GB/T 5291.1—2001eqv ISO 11090—1：1998《电火花成形机　精度检验　第 1 部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）》标准引用了 GB/T 17421.1—1998eqv ISO 230—1：1996《机床检验通则 第 1 部分：在无负荷或精加工条件下机床的几何精度》标准、GB/T 17421.2—2000eqv ISO 230—2：1997《机床检验通则　第 2 部分：数控机床轴线的定位精度和重复定位精度的确定》标准等。

对于现行国家或行业标准未涵盖的特种加工机床产品，或产品的某些其他质量要求，可以用地方标准或企业标准作为检测依据。在国家监督抽查中，以国家或行业标准为检测依据。在市场经营中，或对产品质量有争议时，或用于其他目的时，可以合同约定为检测依据。当然合同约定中的内容，不得违反涉及人身安全、人体健康及公共卫生、环境保护等强制性标准所规定的要求。

标准本身也在不断发展。例如，关于双立柱型的电火花成形机的精度检验标准、低速走丝电火花线切割机的精度标准等，在近期内会随着采用国际标准而颁布新的国家标准。其他产品标准，例如高速电火花小孔加工机的精度检验标准等也将制订、颁布。这些新的标准，将更多地覆盖电加工机床的产品，更好地规范电加工机床产品的质量。

2　抽样

要对批量生产的产品进行质量判断而不可能逐台检验时，应进行抽样检验。抽样是整个检验过程的重要一环，在有些情况下，对检查批的产品质量的判断有决定性影响。抽样方式要保证抽样有代表性与随机性，样本大小与判定规则构成的抽样方案要有合理性。

国家标准 GB/T 2828—1987《逐批检查计数抽样程序及抽样表（适用于连续批的检查）》标准规定了合格质量水平（AQL）一个质量指标。鉴于电加工机床生产企业的实际情况，多年来对检查批批量（N）和样本大小（n）是按表 7.4-1 规定进行的。

表 7.4-1　检查批批量与样本大小

月产量/台	检查批批量 N	样本大小 n
≤10	≥3	1
11 ~ 20	≥5	1
21 ~ 30	≥7	1
31 ~ 50	≥9	1
>50	≥11	1

电加工机床产品的出厂检验，应逐台检验，并按相关标准的出厂检验项目逐一进行。

3　测量不确定度评定

为合理地表示测量值的分散性，需要评定检测结果的不确定度。评定依据为 ISO 出版的《测量不确定度表示指南》（即 GUM），1993。评定不确定度的基本顺序如图 7.4-1 所示。

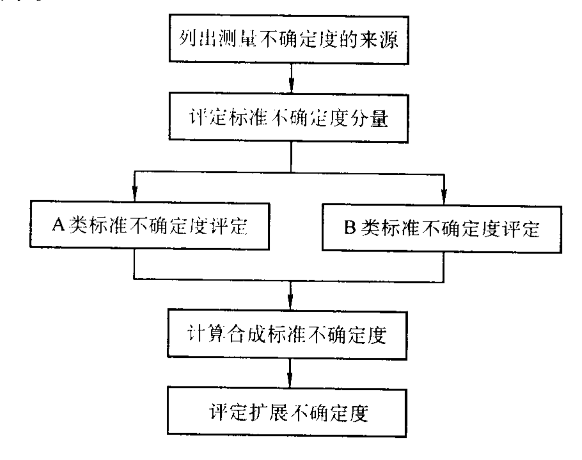


图 7.4-1　评定不确定度的基本顺序

用对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度，称为不确定度的 A 类评定。通常用以计算一列测量值实验标准偏差的方法，均可用以计算 A 类标准不确定度。利用贝塞尔公式：

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \tag{7.4-1}$$

式中，x_i 为第 i 次测量的观测值；$\bar{x}$ 为 n 次测量所得观测值的算术平均值。

当以 $\bar{x}$ 为测量结果时，其标准不确定度为：

$$u(\bar{x})=\frac{S}{\sqrt{n}} \tag{7.4-2}$$

用不同于对观测列进行统计分析的方法来评定标准不确定度，称为不确定度的B类评定。利用以前的测量数据和外部有关技术资料（例如仪器说明书、校准证书、手册的参考数据等），可以确定测量值的上限 $a_{上}$ 和下限 $a_{下}$，再结合分布类型和覆盖因子 k，利用下式计算B类标准不确定度：

$$u(x)=\frac{(a_{上}-a_{下})}{2k}=\frac{a}{k} \tag{7.4-3}$$

式中，a 为测量值的区间半宽度。

常见分布的 a 值、k 值及与标准不确定度的关系，可以查阅相关资料。

当测量结果是由若干个其他量的值求得时，按其他各量的方差算得的标准不确定度，称为合成标准不确定度。当已知不确定度所包含若干个不确定度分量的值，则合成标准不确定度 u_c 可按下式计算：

$$u_c=\sqrt{\sum u_i^2} \tag{7.4-4}$$

扩展不确定度是确定测量结果区间的量。一般情况下用 U 表示：

$$U=ku_c \tag{7.4-5}$$

式中，k 为包含因子，大多数情况下取 $k=2$。

关于测量不确定度的评定与表示，请参阅其他文献。

4 粗大检验误差的判别

检验结果不可避免地含有误差，但误差分析涉及到一些复杂的理论。由于在对机床产品的检验中所做的测量和试验属于技术测量，只需考虑误差上限，因此无需进行详细的误差分析。这里只对粗大检验误差的类别作一介绍。

所谓粗大检验误差是指超出在规定条件下预期的检验误差。这种误差的最大特点是使一个或几个值与其他值的差异很大。在检验中，检验结果有一定的离散是正常的。但若存在一个或几个离散性太大的数值时，这些数值称之为可疑值。可疑值可能有粗大检验误差值，如果是这样的话，则可将其剔除；也可能没有粗大检验误差值，则不能随便剔除。

判别是否是粗大检验误差值的方法有多种，这里只介绍莱伊达（Райт）准则与格拉布斯（Grubbs）准则两种。

（1）莱伊达判别法

莱伊达判别法也称 $\pm3\sigma$ 判别法。该方法指在相同条件下，对检验对象进行多次检验得到的测量数值 x_1、x_2、…、x_n 中，如果某个数值的残余误差满足：

$$|u_i|=|x_i-x|>3\sigma \tag{7.4-6}$$

式中，u_i 为单次检验结果的残余误差；x_i 为单次检验结果；x 为 n 次检验结果的算术平均值；σ 为标准差。

则认为检验结果（即检验测量数值）x_i 含有粗大检验误差，应将其剔除。

σ 为标准差，它是表征一组重复测量结果随机误差大小的一个重要参数。随机误差的分布规律服从于正态分布，因此该判别法的应用步骤如下。

1）计算重复检验数值列的算术平均值 $\bar{x}$：

$$\bar{x}=\frac{x_1+x_2+\cdots+x_n}{n}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i}{n} \tag{7.4-7}$$

2）计算重复检验数值列的标准差 σ：

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}u_i^2}{n-1}} \tag{7.4-8}$$

标准差 σ 也可以按下式计算：

$$\sigma=\frac{R_n}{d_n} \tag{7.4-9}$$

式中，R_n 为极差，即最大检验值 x_{max} 与最小检验值 x_{min} 之差，$R_n=x_{max}-x_{min}$；d_n 为极差系数，它与检验次数有关，其数值见表7.4-2。

表7.4-2 极差系数 d_n 与检验次数 n 的关系

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_n	1.128	1.693	2.059	2.326	2.534	2.704	2.847	2.970	3.078

众所周知，对正态分布而言，以 $\pm3\sigma$ 为置信区间时，置信概率为99.73%。在质量检验中，测量次数是有限的，检验误差值超出 $\pm3\sigma$ 的机会很小。如果发生这种情况，就可以判定检验结果（检验测量数值）含有粗大检验误差，应将其剔除。

（2）格拉布斯判别法

格拉布斯判别法是根据顺序统计量的某种分布规律的判别检验结果是否有粗大检验误差的准则。应用步骤如下。

将 n 次重复检验所得的检验结果（测量数值），由小到大排成顺序统计量：$x(1)\leqslant x(2)\leqslant\cdots\cdots\leqslant x(n)$

计算 n 次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 及标准差 σ：

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{7.4-10}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \tag{7.4-11}$$

计算顺序统计量的 $g(1)$ 和 $g(n)$：

$$g_1=\frac{x(1)-\bar{x}}{\sigma}$$

$$g_n=\frac{x(n)-\bar{x}}{\sigma}$$

当选择显著性水平（置信度）$\alpha=0.01$ 时，格拉布斯临界系数 λ（0.01，n）由表7.4-3给出。

表7.4-3 格拉布斯临界系数 λ 的取值

n	λ（0.01，n）
3	1.16
4	1.49
5	1.75
6	1.94
7	2.10

在置信度 $\alpha=0.01$ 时，置信概率 $P_n=99\%$。当 $g(1)$ 和 $g(n)$ 中较大者 $g(i)\geqslant\lambda(0.01,n)$ 时，则该 $g(i)$ 存在粗大检验误差，应予剔除。然后对剔除了该 $g(i)$ 后余下的顺序数据列再按上述方法进行判别，直至所有测量数据均不含粗大检验误差。

5 首次检验结果出现“边缘数据”时的处理

对于首次检验结果所得的测量数据落在被测参数允差界限 $\pm T/10$（T 为规定的被测参数之允差）范围以内时，称该测量数据为“边缘数据”。为了保证检验结果的可靠性，应至少重复检验二次，将前后至少三次重复检验的结果进行粗



大误差检验。若判别存在有粗大检验误差，应将其剔除。若不存在粗大检验误差，则可以重复检验所得的测量数据的算术平均值作为最终检验结果。

6 数据处理

产品检验中，通过技术测量所获得的检验结果一般为测量数据。检验人员不可避免地要对所获得的数据进行处理，如数据的取舍与运算、数据的修约等。毫无疑问，数据处理的正确与否，对检验结果有直接的影响，因此在检验中具有重要意义。这里仅对检测工作中经常遇到的几个有关数据处理的问题作介绍。

（1）有效数字与近似数

根据误差公理，测量总是存在误差。测量所得的结果只能是一个接近真值的估计值，其数字是一个近似数。当该近似数的绝对误差的模小于该数字最末一位数字所对应的单位量值的 0.5 时，从左边的第一个非零数字起，到最末一位数字为止的所有数字，为该近似数的有效数字。一个数最末一位数字所对应的单位量值，也称为这个数的“末”。例如，某长度测量值为 28.6 mm，则这个数的“末”为 0.1 mm，这个数的有效位数为 3 位，这个数的绝对误差的模小于 0.05 mm。若某测量长度为 28.60 mm，这个数的“末”为 0.01 mm，这个数的有效位数为 4 位，这个数的绝对误差的模小于 0.005 mm。可见测量结果的数字的有效位数代表了结果的不确定度。有效位数不同，其测量不确定度也不同。

（2）近似数的运算

对于加减运算，当参与运算的数不超过 10 个时，运算时以各数中“末”最大的数为基准数，其余各数均比该基准数多保留一位，多余的位数则舍去。运算的结果是将运算所得数的“末”取成与上述基准数的“末”相同。

例如，$3.5446+20.6+0.286 \rightarrow 3.54+20.6+0.29=24.43\ (\text{mm}) \approx 24.4\ (\text{mm})$。

如果运算结果还要参与下一步运算，则可多保留一位。在上例中则取 24.43 mm。

对于乘、除（或乘方、开方）运算，以参与运算的各数中有效数字最少的那个数为基准数，其余各数的有效数字均比该基准数的有效位数多保留一位。运算的结果是将运算所得数的有效数字位数取成与上述基准数相同。

例如，$0.6301 \times 3.4 \times 0.204030 \rightarrow 0.630 \times 3.4 \times 0.204=0.437\ (\text{mm}) \approx 0.44\ (\text{mm})$

如果运算结果还要参与下一步运算，则可多保留一位。在上例中则取 0.437 mm。

（3）数据的修约

检测时，读数的有效位数一般比允差的有效位数多一位，末位数可为估读数字。数据在按规定运算后，需进行修约。所谓修约，是指对某一个拟修约数，根据保留位数的要求，将其多余位数的数字进行取舍，按照一定的规则，选取一个基值为修约间隔整数倍的数，来代替拟修约数，这个数称为修约数，这个过程称之为数据修约，GB/T 8170—1987《数值修约规则》对数据的修约方法作了规定。

修约间隔一般以 $k \times 10^n$（$k=1, 2, 5$；n 为正负、整数）来表示。修约间隔确定后，修约数只能是修约间隔的整数倍。特别要提出的是在特种加工机床的检测中，经常遇到数据四舍五入的有关规定要求。

1）当拟舍弃数字的最左一位数字小于 5 时，则舍去。例如将数字 0.3458 修约到一位小数，结果为 0.3。

2）当拟舍弃数字的最左一位数字大于 5 时；或者是 5，但其后跟有并非全部为零的数字时，则进一。例如将数字 9.5001 修约至个位数，结果为 10。

3）对于拟修约的最左一位数字为 5 时，而右边无数字或都为零时，若保留的末位数字为奇数（1，3，5，7，9），则进一；若保留的末位数字为偶数或零（0，2，4，6，8），则舍去。例如拟修约数为 2.250，指定修约间隔为 0.1，则修约值为 2.2；拟修约数为 1 350，指定修约间隔为 100，则修约值为 1 400。

需要注意的是拟修约数字应在确定修约位数后一次修约获得结果，不得多次连续修约。

7 重要度

重要度是指质量标准要求的内容在产品质量中的重要程度。重要度的分级有多种，特种加工机床产品的重要度与其他金切机床一样，分为 A、B、C 三个级别。

1）A 级重要度　对于直接影响机床产品的结构、性能、精度、安全性、可靠性及使用寿命等的关键项目属于 A 级重要度。我国《产品质量法》规定了产品缺陷主要是产品在安全性、可靠性等特性方面存在可能危及人体健康、人身及财产安全的不合理危险。因此，产品质量中存在产品缺陷的项目，均属 A 级重要度。它包括《电火花加工机床　安全防护要求》标准中所涉及的所有重要项目。《产品质量法》规定了产品瑕疵，包括产品在适用性、安全性、可靠性、维修性等各种特性和特征方面的质量问题。在产品质量中存在重要的产品瑕疵的项目，也属 A 级重要度，它包括各类电加工机床精度检验项目中的质量指标等。

2）B 级重要度　对于机床产品的结构、性能、精度、安全性、可靠性及使用寿命等无直接影响或影响不大的、在质量指标中有独立特征的项目和部位，属于 B 级重要度。如机床手柄的操纵力等。

3）C 级重要度　对于修饰质量或服务性作用方面以及可操作性差的一些项目，属于 C 级重要度。

需要指出的是，B 级和 C 级重要度的检验内容在出现严重质量问题时，也将对判定产品是否合格起重要作用。

8 满足度

满足度是指产品的检验项目达到标准规定要求的程度。在实际操作中，一般用不满足度，即产品的检验项目未达到标准规定要求的程度，比较清楚明了。不满足度一般依据产品的检验项目不满足标准规定要求的程度，分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个等级：

1）Ⅰ级　指产品的检验项目存在严重的，或称为致命的质量问题；

2）Ⅱ级　指产品的检验项目存在比较严重的质量问题；

3）Ⅲ级　指产品的检验项目存在一般质量问题。

产品质量的各个检验内容，不论其重要度为 A、B、C 哪一级，都可能出现上述三个等级的不满足度。在产品质量检验中，任何等级重要度的检验内容，只要出现Ⅰ级不满足度即判为不合格品。在 A 级重要度的检验内容中，若出现Ⅱ级或Ⅲ级不满足度，也判为不合格品。B 级、C 级重要度中允许出现、存在Ⅱ级或Ⅲ级不满足度，但应控制在一定范围内。

不满足度控制表 7.4-4。

表 7.4-4　不满足度控制表

重要度	不满足度		
	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级
A	不合格	不合格	不合格
B	不合格	≤10%	≤20%
C	不合格	≤15%	≤30%

编写：连克仁（苏州电加工机床研究所）

第5章 电火花加工机床的精度检测

1 电火花加工机床精度检测的一般要求与特点

机床的精度是反映机床产品质量的重要指标，精度检测是质量检测中的主要内容之一。电火花加工机床的精度检测与其他金切机床精度检测相比，既有共同的要求，又有自身的特点。

1）检验环境 检验特种加工机床精度时，要求环境的温度、湿度、场地等符合机床的使用环境条件，应该避免有过强的气流、阳光的直接照射、热源的辐射、周边振动的干扰等。

对于某些精密机床，如某些进口的精密电火花线切割机或电火花成形机，有恒温的要求，应该在所要求的恒温条件下进行检验，同时检验所用的量具等在使用前应等温。整个精度检测过程应该注意温度的变化。在某些精度项目中，温度的变化对检测结果的影响很大，应该予以避免与防止。如碳钢的线膨胀系数为 11.1×10^{-6} mm/℃，它意味着温度每变化1℃，100 mm长度的构件变化量是1.1 μm，这对机床的定位精度有重大影响。此外，在加工精度的检测中，样件如果在计量室测量，由于计量室一般均有恒温设施，因此在测量前也应该将样件等温足够的时间再做测量。

检验场地应能保证各项检测工作的正常开展，地基应该坚硬。在某些检验项目中，对机床的周边场地有明确的规定要求，如机床的噪声检测项目，这些条件应该得到满足。

检验环境应该干净、清洁，不得有明显的灰尘等飘浮物。这一点除了因为灰尘等飘浮颗粒沾在机床运动部件（如导轨等）与检具（如平尺、角尺等）表面，会影响检测的准确性外，还因为某些光学测量仪器，如激光测量仪，一旦遭到灰尘颗粒或飞虫的侵扰，有可能破坏激光束的传输，使检测中断。

2）检验项目 机床的精度检验项目，因检验目的的不同而不同。简单来讲，生产企业在组织生产，对产品做出厂检验时可按企业标准进行。用户在验收机床时，可按与供应方签订的合同中约定的内容与要求作验收检验。监督抽查时，检测机构按有效国家标准进行检验。

机床的精度检验项目，包括几何精度、数控运动精度及加工精度三个方面。这里所讲的精度检验项目，是对机床产品的整机的精度检验而言。对于主要的电火花加工机床品种，都颁布了相应的精度（或精度检验）国家标准。当产品的检验是为了某种目的，则还应该满足产品的技术条件标准中所规定的项目，对产品的主要零件精度及主要装配精度做检验。

此外，机床的精度还受到反映机床品质的其他一些项目因素的影响，如机床的热变形、机床的静刚度、机床的振动、进给运动的均匀性等。这些项目都可以有检验测量的方法，但缺乏定量的指标，因此只能作为评价机床品质时的参考。同样，电火花加工机床的加工精度，由于影响因素很多，导致加工件精度的离散。这种加工精度的离散程度，或者反过来讲是加工精度的重复一致程度，其实才真正表征了机床的加工精度水平。我们可以通过加工一批样件，用统计方法计算加工尺寸的样本标准差 s，一般取 $6s$ 即可有效地表示加工精度的离散程度。这样的检验，同样在评价该机床的品质时才进行。

3）检验次序 电火花加工机床的精度检验标准中，都注明标准中所列的项目顺序并不代表检验次序，为了装拆检验工具和检验方便，可按任意次序进行检验。但是检验一般次序应该符合下面的路线：

调整安装水平→检验几何精度→空运转、负荷试验→复检冷态几何精度→空运转、升温→检验数控运动精度→检验工作精度。

机床检验前必须进行调平，以使机床具有良好的静态稳定性，才能开展以后的检测。在电火花加工机床的精度检验标准中，调平的要求有些被列入一般要求，有些被列为预调项目。有的虽然未明确列出调平要求，但同时规定了机床检验前的安装应参照GB/T 17421.1的标准，而在GB/T 17421.1标准中要求机床检验前进行调平。

几何精度检验中，需要注意项目的相关性。如绝大多数电火花加工机床具有工作台，对工作台台面的平面度往往需要先行检验。因为工作台的台面在某些现行标准中构成其他诸多几何精度项目检验的基础，为了保证这些几何精度项目检验的有效性，工作台台面的平面度必须得到保证。少数电火花加工机床没有这样一个工作台，例如电熔爆外圆加工机床的结构类似于卧式车床，此时应该先行检验溜板移动时在垂直面内的直线度与倾斜等项目。在某些金属切削机床的精度检验中，需作预调检验，主要是对导轨精度的检验，这也是后续其他几何精度检验项目的基础。电熔爆外圆加工机床精度检验标准中，未专门列出预调检验项目，但是在实际检验时，仍应该先行检验上述涉及主导轨精度的项目。

电火花加工机床一般来讲不存在高速、重载的部件，但是机床部件的运动及放电加工过程都会引起机床的变形，对机床的某些精度项目（例如数控轴的定位精度）可能会产生较大的影响。因此在检验机床的数控运动精度前，应先开动机床，尽量达到热平衡状态。某些精密的电火花加工机床（例如精密型低速走丝电火花线切割机），虽然机床本身采取了许多防止热变形的措施，但是要获得高精度的加工效果时，仍要求在加工前先开动机床一段时间（例如半小时），也是一样的道理。

4）检验方法与量检具 检验方法中所包括的采用的测量仪器与量检具、仪器检具的安置位置、数据处理方法等的不同，都可以对测量结果产生影响，有时的影响是重大的。不同的检验方法可以导致不同的检验结果，因此不论是何种类型的检验，其方法应该明确、科学，与被检测项目的精度要求相适应。例如，采用水平仪，采取网络布点法检测机床工作台面的平面度时，用“三点法”进行数据处理，还是用“对角线法”进行处理，计算的结果可能会相差很大。如果采用移动平尺加可调量块来测量，则测得的平面度误差又不一样。如果用平板检验（有时用于小尺寸的磨削或铲刮平面的检验），则结果的评定为接触面积或规定面积内的接触点的数量，检验的结果将用另一种形式来表示。再例如，对于机床数控线性轴运动的定位精度的测量，以往电火花加工机床精度标准规定的方法与日本的JISB6336标准基本一致。当采用ISO230－2标准或VDI/DGQ3441标准所规定的方法时，对同一台机床的同一根运动轴的测量结果会有很大的差别，后者显示的定位精度、重复定位精度及反向差值等数据要大得多。

电火花加工机床的精度标准中，对每一个精度检验项目都规定了检验方法，并以简图来表示。然而在某些精度项目



的检验中，检验方法有可能不是唯一的。是否可以采用另外的检验方法，判断的原则一是所采用的方法是否为 GB/T 17421 系列标准中所规定的方法；二是所采用的方法是否为产品标准所规定方法的等效方法。所谓等效方法是指测量精度等于或高于产品标准所规定的检验方法。如果是等效方法，则可采用，否则就不能采用。特种加工机床产品的精度标准中，某些检验项目规定了不同的测量仪器，这就意味着可以采用相应的不同测量方法。例如，GB/T 5291.1—2001《电火花成形机　精度检验　第 1 部分：单立柱机床》标准的 G1、G2 项，规定了用平尺、千分表和量块作为测量仪器，也规定了可以用光学方法。应该讲，采用光学方法的测量精度一般不低于用平尺、千分表和量块所能得到的测量结果，因此是等效方法。

检验所用的量检具应该是检验方法所要求的。量检具的误差将成为测量不确定度的一部分，因此量检具的精度应该与检测项目的允差相适应，能够满足检测的要求。GB/T 17421.1—1998（eqv ISO230－1：1996）标准对检验机床精度用的工具和装置的要求作了说明。在该标准的附录 A 中，列出了平尺、检验芯棒、角尺、水平仪、线性位移测试器、平板、自准直仪、激光干涉仪等 12 种重要的常用检具的精度与使用注意事项。例如，平尺工作面的直线度误差应不超过（2＋0.01 *L*）/1 000（*L*：以 mm 为单位的工作长度），对于 500 mm 工作长度的平尺，这个数值为 0.007 mm。而 JJG 计量检定规程中，对 500 mm 工作长度的 0 级与 1 级精度的平尺，其工作面的直线度允差分别为 0.003 和 0.006 mm。因此一般来讲 0 级与 1 级精度的平尺即能满足要求。

2　电火花成形机的精度检验

本节介绍电火花成形机产品精度检验的基本方法与检验要点。

2.1　检验要求说明

1）适用标准与项目　适用标准：GB/T 5291.1—2001《电火花成形机　精度检验　第 1 部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）》。适用项目：G1～G13、P1～P5、M1。

P2～P5 项的检验仪适用于数控电火花成形机。对于普通电火花成形（即非数控电火花成形机），不作 P2～P5 项的检验。对于单轴数控电火花成形机，作 P4 项检验。对于无旋转轴的数控电火花成形机，不作 P5 项检验。

检验项目中的 M1 项，是对电火花成形机的加工检验。要求检验精加工孔的 a）间距精度；b）*X* 方向和 *Y* 方向的直径差。对于 *X* 轴与 *Y* 轴具有数控运动功能，或 *X* 轴与 *Y* 轴具有数显装置的电火花成形机，应检验 a）、b）两个指标。对于 *X* 轴与 *Y* 轴不具有数显装置的普通电火花成形机，只检验 b）指标。

2）检验某一项目时，不参与或不发生运动的线性运动轴应位于该轴行程的中间位置。运动轴的驱动速度应该是快速，或正常工况时的进给速度。具有螺距误差补偿功能与间隙补偿功能的机床，可在使用这些功能的条件下进行检验。

3）当实际测量长度与该标准所规定的长度不同时，允差值可根据 GB/T 17421.1—1998 标准中“2.3.1.1 计量单位和测量范围”的要求进行折算，折算后的允差值修约至三位小数（以 mm 为单位），最小允差值应符合 GB/T 5291.1—2001 标准中“4.7 最小允差”的要求，即为 0.005 mm。

对于主参数（工作台台面宽度 *B*×工作台台面的长度 *L*）符合 GB/T 5290.1—2001《电火花成形机参数第 1 部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）》标准所规定的系列尺寸的，国内常见规格的电火花成形机的各项几何精度检验项目（G1～G14）的允差折算见表 7.5-1。

表 7.5-1　GB/T 5291.1—2001 标准几何精度检验项目允差折算一览表　mm

序号	检测项目			GB/T 5291.1—2001 允差	测量参数（*B*×*L*）							
					200×320	250×400	320×500	400×630	500×800	630×1 000	800×1 250	1 000×1 600
G1	*X* 轴运动直线度	*a*	*XY* 面	0.015/任意 500 上	*X*:200 0.006	*X*:250 0.008	*X*:320 0.015	*X*:400 0.012	*X*:500 0.015	*X*:630 0.019※	*X*:800 0.024※	*X*:1 000 0.030※
		b	*ZX* 面									
G2	*Y* 轴运动直线度	*a*	*XY* 面	0.015/任意 500 上	*Y*:160 0.005	*Y*:200 0.006	*Y*:250 0.008	*Y*:320 0.010	*Y*:400 0.012	*Y*:500 0.015	*Y*:630 0.019※	*Y*:800 0.024※
		b	*ZX* 面									
G3	*X* 轴运动 *Y* 轴运动的垂直度			0.015/任意 300 上	*Y*:160 0.008	*Y*:200 0.010	*Y*:250 0.012	*Y*:320 0.016※	*Y*:400 0.020※	*Y*:500 0.025※	*Y*:630 0.032※	*Y*:800 0.040※
G4	*Z* 轴运动垂直度	*a*	与 *X* 轴运动	0.02/任意 300 上	*Z*:200 0.013	*Z*:250 0.017	*Z*:300 0.020	*Z*:350 0.023※	*Z*:400 0.027※	*Z*:450 0.030※	*Z*:500 0.033※	*Z*:550 0.037※
		b	与 *Y* 轴运动									
G5	*W* 轴运动垂直度	*a*	与 *X* 轴运动	0.015/任意 300 上	*W*:150 0.008	*W*:200 0.010	*W*:250 0.012	*W*:300 0.015	*W*:350 0.018※	*W*:400 0.020※	*W*:450 0.022※	*W*:500 0.025※
		b	与 *Y* 轴运动									
G6	主轴偏摆（*L*＝200）			0.04/任意 300 上	*Z*＝200 0.027	*Z*＝250 0.033	*Z*＝300 0.040	*Z*＝350 0.047	*Z*＝400 0.053	*Z*＝450 0.060	*Z*＝500 0.067	*Z*＝550 0.073
G7	工作台面平面度			0.03/1 000 内	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.040	0.040
G8	工作台面平行度	*a*	与 *X* 轴运动	0.015/任意 300 上 Max:0.04	0.016※	0.020※	0.025※	0.032※	0.040※	0.040※	0.040※	0.040※
		b	与 *Y* 轴运动		0.010	0.012	0.016※	0.020※	0.025※	0.032※	0.040※	0.040※
G9	T 形槽直线度			0.02/任意 500 上 Max:0.05	0.013	0.016	0.020	0.025※	0.032※	0.040※	0.050※	0.050※
G10	T 形槽 *X* 轴运动平行度			0.015/任意 300 上 Max:0.04	*X*:200 0.010	*X*:250 0.012	*X*:320 0.016	*X*:400 0.020	*X*:500 0.025	*X*:630 0.032	*X*:800 0.040※	*X*:1 000 0.040※

续表 7.5-1

序号	检测项目			GB/T 5291.1—2001 允差	测量参数（$B \times L$）							
					200×320	250×400	320×500	400×630	500×800	630×1 000	800×1 250	1 000×1 600
G11	电极板平行度	*a*	与 *X* 轴运动	0.015/任意 200 上	*L*:100 0.008	*L*:150 0.011	*L*:200 0.015	*L*:250 0.019※	*L*:300 0.022※			
		b	与 *Y* 轴运动									
G12	*C* 轴径向跳动	*a*	近端	0.005	0.005							
		b	远端	0.01	0.010							
G13	*C* 轴与 *Z* 轴运动平行度	*a*	*ZX* 面	0.01/任意 100 上	*Z*:200 0.02※	*Z*:250 0.025※	*Z*:300 0.030※	*Z*:350 0.035※	*Z*:400 0.040※	*Z*:450 0.045※	*Z*:500 0.050※	*Z*:550 0.055※
		b	*YZ* 面									
G14	主轴与工作台侧向间隙	*a*	*X* 向	0.04	0.040							
		b	*Y* 向									

注：※表示还应同时符合项目允差的其他规定要求。

2.2 电火花成形机几何精度检验

2.2.1 线性运动轴运动直线度的检查

GB/T 5291.1—2001G1 和 G2 项规定了 *X* 轴运动和 *Y* 轴运动直线度的检查。对于 *X* 轴，规定：a）在 *XY* 水平面内，b）在 *ZX* 垂直面内的直线度允差；对于 *Y* 轴，规定：a）在 *XY* 水平面内，b）在 *ZY* 垂直面内的直线度允差。允差值均为：在任意 500 测量长度上为 0.015。测量器具为平尺、千分表和量块，也可以采用激光测量仪等光学量仪测量。

测量简图如图 7.5-1 和图 7.5-2 所示。

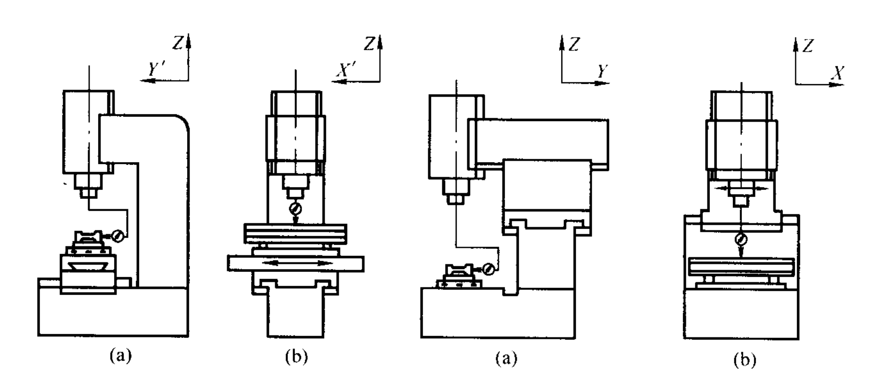


图 7.5-1　*X* 轴运动直线度的检查简图

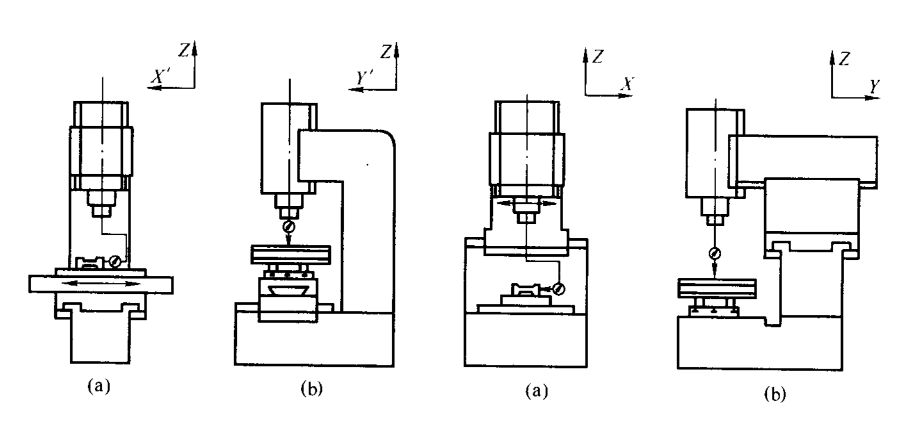


图 7.5-2　*Y* 轴运动直线度的检查简图

检验步骤如下。

1）根据被测轴的行程选择一根长度与其相适应的 0 级平尺，并将其置于机床工作台上（注意：尽量不使用刮研平尺。如果使用刮研平尺，应用量块垫于千分表测头与平尺工作面之间进行测量）。在测量 *XY* 水平面内的直线度时，平尺的工作面应垂直于机床工作台面，非工作面可直接与机床工作台面接触。在测 *ZX* 或 *ZY* 垂直面内的直线度时，平尺工作面应与工作台面平行，其下工作面的白塞尔点位置（距平尺两端各为全长的 2/9 处）应用两等高块或两组量块支承。

2）将千分表固定在主轴头上，非测量轴置于行程中间。调整千分表与平尺的位置，使得被测轴全行程移动时，千分表测头均能与平尺工作面接触，且千分表的测量轴线与平尺工作面垂直。

3）快速移动被测轴，调整平尺，使得千分表的读数在行程的两端点相等。测量 *XY* 水平面内的直线度时，只要沿水平方向轻轻转动平尺，即可使两端点读数相等并置零。测 *ZX* 和 *ZY* 垂直面直线度时，可以通过调整支承量块组的尺寸来使被测轴两端点读数相等并置零；如果支承采用等高块，可以不将两端点调等值，测量时分段取点读数即可。

4）测量取值　对两端点调零的测量，如被测轴行程不超过 500 mm，测量时在全行程上正反向移动被测轴，千分

表上读数的最大差值，即为该轴运动的直线度误差。如被测轴行程超过 500 mm，而被测轴全程移动时，千分表读数的最大差值不超过允差 0.015 mm，此值也可以视为该轴运动的直线度误差；否则需分段取点读数，计算在任意 500 mm 测量长度上的直线误差值，以其中最大值作为该轴的直线度误差值。

对两端点不调零的测量，无论其行程是否超过 500 mm，均需分段取点读数，采用端点连线，用计算法或作图法获得其误差值。分段取点时，应根据被测轴的长度和全行程内千分表的读数趋势取点。一般情况下：①千分表读数的拐点不能遗漏；②全行程取点数不能少于 5 点，任意 500 mm 上不能少于 5 点；③为计算方便，分段应均匀。

5）分段取点读数的数据处理

① 计算法　其计算方法与步骤举例见表 7.5-2。

表 7.5-2　直线度误差值的计算　μm

测量序号	1	2	3	4	5	获得方法
读数值	0	-1	-5	-2	8	千分表读取
旋转量	0	2	4	6	8	末点读数值与首点读数值之差的相反数除以分段数，乘以测点序号与首点序号之差
误差值	0	1	-1	4	0	读数值与旋转量的代数和
测量段的直线度误差值 $\Delta=4-(-1)=5$						$\Delta=\max$（误差值）$-\min$（误差值）

② 作图法　在坐标纸的 X 轴上截取分段取点的序号，在 Y 轴上按读数值取点。依次连接各点，得出直线度误差的曲线。按每个任意 500 mm 行程作首尾两点（不足 500 mm 行程的，取全行程首尾两点）连线。作两条该连线的平行线，使其通过该行程误差曲线上相对于首尾两点连线的最高点和最低点。则此两平行线间的 Y 向坐标值之差，即为该 500 mm 行程的直线度误差。取各个 500 mm 行程的直线度误差的最大值为该轴的直线度误差值。例如：一行程为600 mm 的线性轴，按上述方法测得的千分表读数见表 7.5-3。

表 7.5-3　分段取点读数举例

分段取点位置	0	100	200	300	400	500	600
读数值	0	2	5	3	-2	-3	-4

按上述方法作出的直线度误差图见图 7.5-3。该轴的直线度误差为：6.2 μm

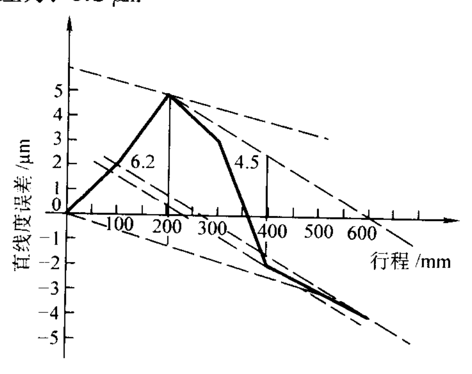


图 7.5-3　直线度误差图

2.2.2　X 轴运动与 Y 轴运动之间垂直度的检查

GB/T 5291.1—2001G3 项规定此项的允差为：在任意 300 测量长度上为 0.015。测量仪器为平尺、角尺和千分表，也可使用激光测量仪等光学仪器。

测量简图见图 7.5-4。

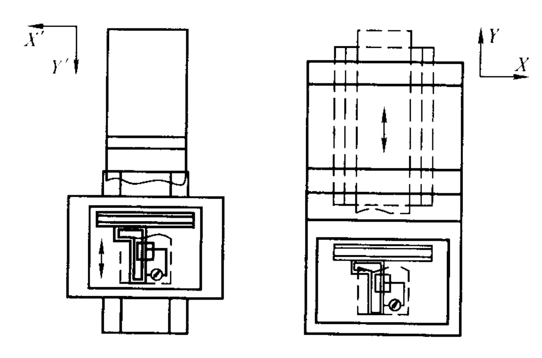


图 7.5-4　X 轴运动与 Y 轴运动间的垂直度的测量简图

检验步骤如下。

1）根据被检机床 X 轴和 Y 轴的行程，选择一工作面尺寸与其相适应的、精度不低于 0 级的直角尺。如果 X 轴和 Y 轴行程超过一定的范围，使得直角尺的长边尺寸难以适应，可采用 0 级以上的平尺与直角尺组合使用。

2）将直角尺平放在机床工作台面上，使其工作面与工作台面垂直，并使直角尺长边与机床 X 轴基本平行。如用平尺，应使平尺工作面平行于 X 轴并与工作台面垂直，使直角尺的短边与平尺工作面贴合。机床主轴头和主轴均应置于行程的中间位置并锁紧。千分表固定在主轴头上。调整直角尺（含平尺）和千分表的位置，使得 X 轴和 Y 轴在全行程移动时，千分表测头均能与直角尺（平尺）工作面接触。

3）先将千分表测头与直角尺长工作面接触，快速正反向移动 X 轴，轻微调整直角尺，使得千分表读数在直角尺的两端点读数相等。此轴即可作为垂直度测量的基准轴。如用平尺作为测量的基准，此项调整应在平尺上进行，调整完毕后，平尺应固牢，再将直角尺的短工作面与其紧密贴合。

4）千分表测头置于直角尺的另一工作面上，移动 Y 轴，在全行程上读取读数。如果被测 Y 轴的行程大于直角尺工作面的长度，可在直角尺满量程后，重新架表，使其测头移至直角尺工作面前端与其接触，并将千分表示值调至移动前的位置，继续测量读数。

5）数据处理　对于测量长度不超过 300 mm 的测量轴，千分表在全行程上读数的最大差值即为垂直度误差。对于测量长度超过 300 mm 的测量轴，当测量中千分表在全行程读数的最大差值未超过允差 0.015 mm 时，也可以此作为其垂直度误差。当该最大差值超过 0.015 时，应分段取点读数，计算在任意 300 mm 测量长度上的读数差，以其中最大值作为垂直度误差。分段取点时，千分表读数的拐点和突变点应包含在内。

2.2.3　主轴（Z 轴）垂直运动与 X 轴运动及 Y 轴运动之间垂直度的检查

GB/T 5291.1—2001G4 项规定此项的允差为：对于图 7.5-5a 和图 7.5-5b，在任意 300 mm 测量长度上为 0.02。测量仪器为圆柱角尺、平板、调整块和千分表，也可以用平尺、量块和直角尺。

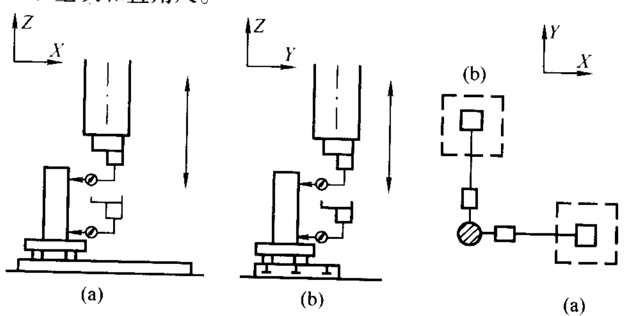


图 7.5-5　Z 轴运动与 X 轴运动及 Y 轴运动间的垂直度的测量简图

测量简图见图 7.5-5。

检验步骤如下。

1）根据机床工作台面尺寸和 X 轴、Y 轴行程选择一尺寸与其相适应的 0 级平板，根据 Z 轴行程选择一高度与其相适应的圆柱角尺。如果 X 轴、Y 轴行程超过一定的范围，使得选用的平板过大、过重，可选用尺寸与其相应的 0 级平尺和直角尺。

2）将平板用三个调整块支承置于机床工作台上，圆柱角尺基准面置于平板中间。此时，X 轴、Y 轴应处于行程的中间位置。调整平板与圆柱角尺的位置，使得圆柱角尺在 X、Y 方向上尽量靠近 Z 轴，且当 Z 轴上下运动时，不与圆柱角尺发生干涉。

3）千分表固定在主轴头上，其测头触及平板工作面，来回移动 X 轴和 Y 轴，调整平板，使其工作面与 X 轴运动和 Y 轴运动均平行。即当 X 轴或 Y 轴运动时，千分表在平板两端点的读数基本一致，其读数差不超过 0.002 mm。

4）X 轴和 Y 轴均移动至行程中间，千分表固定在主轴头上，其测头沿测量方向垂直触及圆柱角尺测量面。测量 Z 轴垂直运动与 X 轴运动的垂直度时，千分表测头应垂直触及圆柱角尺与 X 轴运动平行的直径端点所在的侧母线。轻轻移动 Y 轴，在千分表示值出现拐点处停止。同样，测量 Z 轴垂直运动与 Y 轴运动的垂直度时，千分表测头应垂直触及圆柱角尺与 Y 轴运动平行的直径端点所在的侧母线上。轻轻移动 X 轴，在千分表示值出现拐点处停止。

沿 Z 方向，在整个测量长度上移动主轴，分别读取沿 X 方向和 Y 方向触及圆柱角尺侧母线时千分表的读数。

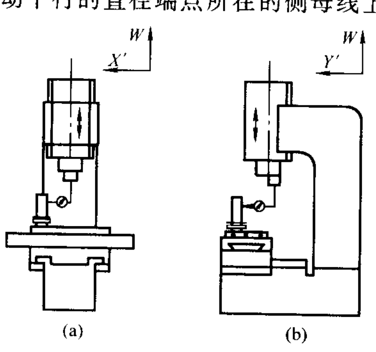
5）用平尺和直角尺代替平板和圆柱角尺时，应将平尺用量块组在其两端白塞尔点处支承，置于机床工作台上。测 Z 轴垂直运动与 X 轴运动垂直度时，调整量块组尺寸，使平尺工作面在垂直面内与 X 轴运动平行。再将直角尺基准面置于平尺上，千分表测头沿 X 方向触及直角尺测量面，上下移动 Z 轴，读取千分表读数。同样，测 Z 轴垂直运动与 Y 轴运动垂直度时，应使平尺工作面与 Y 轴运动在垂直面内平行，千分表测头沿 Y 方向触及置于其上的直角尺测量面，移动 Z 轴读取读数。

6）数据处理　对于测量长度不超过 300 mm 的 Z 轴垂直运动，千分表在全行程上读数的最大差值即为垂直度误差。对于测量行程超过 300 mm 的 Z 轴垂直运动，数据处理方法与 2.2.2 中 5）相同，只是允差值由 0.015 变为 0.020。

2.2.4 主轴头（W 轴）垂直运动与 X 轴运动及 Y 轴运动之间垂直度的检查

GB/T 5291.1—2001G5 项规定此项的允差为：对于图 7.5-6a 和图 7.5-6b，在任意 300 mm 测量长度上为 0.015。该项目的测量仪器、检验步骤以及数据处理均与 2.2.3 相类似。测量时主轴 Z 轴置于行程的中间；数据处理时，允差为 0.015。

测量简图见图 7.5-6。



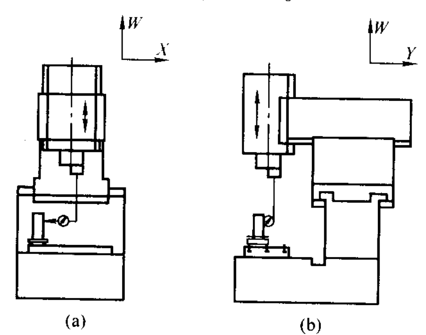


图 7.5-6　W 轴运动与 X 轴运动及 Y 轴运动间的垂直度的检查简图

2.2.5 Z 轴运动中主轴偏摆的检查

GB/T 5291.1—2001G6 项规定此项的允差为：在任意 300 测量长度上为 0.04/200。测量仪器为千分表和圆柱角尺，也可采用直角尺代替圆柱角尺。

测量简图见图 7.5-7。

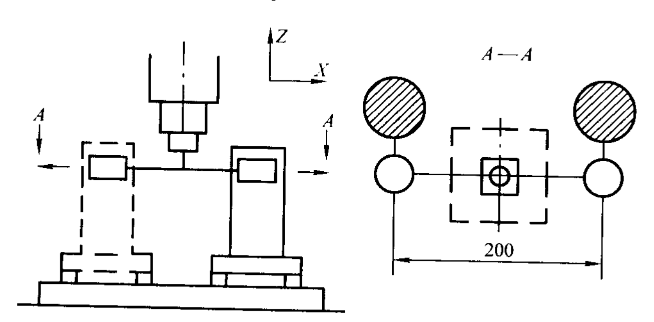


图 7.5-7　Z 轴运动中主轴偏摆的测量简图

检验步骤如下。

1）根据 Z 轴行程选择一高度与其相适应的圆柱角尺或直角尺，并将其置于工作台上。此时，X 轴、Y 轴、W 轴等非测量轴均应处于其行程的中间。

2）将 Z 轴运动至上端行程极限位置，调整圆柱角尺在工作台的位置，使得圆柱角尺沿 Y 方向的侧母线处于主轴的正下方。若用直角尺，应使直角尺基准面的侧边在垂直面内与 Y 轴平行，直角尺测量面的中心线处于主轴的正下方。

3）X 轴向左移动 100 mm。千分表固定在主轴头上，千分表测头从 Y 方向垂直触及圆柱角尺（或直角尺）的侧母线（或直角尺的测量面）的上端。轻微移动 X 轴，在千分表示值出现拐点处停止，将千分表置零。使用直角尺时，应轻微转动直角尺基准面，使其测量面在 X 方向与 X 轴平行，千分表置于测量面中间并置零。记录置零时圆柱角尺（或直角尺）的高度位置。

Z 轴从上往下全行程移动，千分表等距离分段取点读数，获得 δ_i 左。其测点数 i 不少于 5 点。

4）Z 轴向上运动至上端极限，X 轴向右移动 200 mm。按测左边时圆柱角尺（或直角尺）的同样高度、同样方法、同样间隔架表、置零，分段取点读数，获得 δ_i 右。

5）数据处理

① 计算出左右两次测量中，千分表在角尺同样高度处的数值 δ_i

$$\delta_i = \delta_i\,左 - \delta_i\,右$$

② 计算偏摆量 Δ　对于测量高度不超过 300 mm 的 Z 轴行程，按下式计算：

$$\Delta = \frac{\delta_{i\max} - \delta_{i\min}}{d} \tag{7.5-1}$$

式中，Δ 为 Z 轴运动中主轴的偏摆量，mm；$\delta_{i\max}$ 为在每个测量高度上左右两次测量时千分表读数差值中的最大值，



mm；δ_{imax} 为在每个测量高度上左右两次测量时千分表读数差值中的最小值，mm；d 为左、右两次测量时千分表测头间的距离，mm。

对于测量高度超过300 mm的 Z 轴行程，如果在整个测量高度上计算所得的 Δ 不超过允差值0.04/200，此值可作为该轴运动的偏摆量。如果计算所得的 Δ 超过允差值0.04/200，还需计算各300 mm测量高度上的各个 Δ_i，取其中最大值作为测量结果。

2.2.6 工作台面的平面度的检查

GB/T 5291.1—2001G7项规定此项的允差为：在1 000测量长度内为0.03，长度每增加1 000，允差值增加0.001。测量长度指O－X和O－Y中较长边的长度。测量仪器为精密水平仪，或平尺、量块和千分表，或光学仪器，或其他仪器。

工作台面的平面度的测量方法较多，这里介绍常用的精密水平仪按矩阵布线法测量的方法，其测量简图见图7.5-8。

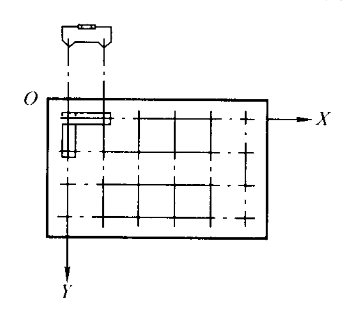


图7.5-8 工作台面的平面度的测量简图

检验步骤如下。

1）将机床的 X 轴和 Y 轴移动至其行程的中间位置。Z 轴和 W 轴原则上置于行程中间。如主轴头过低，影响到测量用水平仪的读数，可适当上置。机床工作台面调水平。

2）根据机床工作台面尺寸选择桥板，按不少于4跨5点的间距调整桥板的跨距（跨距较短时，可用等高块或量块直接置于水平仪下面代替桥板）。具体间距应视工作台面的状态而定，要考虑：①布点时工作台面四周应留有10～50 mm的余量；②测量点应避开T形槽；③若机床主轴头影响到水平仪读数，应尽量避开主轴头正下方位置。

3）将合像水平仪或电子水平仪置于桥板上，按图示矩阵布点，同方向移动桥板进行测量，读出各点水平仪的读数。一般情况下，按布点矩阵图，工作台长边方向的测量线要依次全部测出。工作台短边方向的测量线，只需测量靠近边沿的一条（长边测量线的起始点所在的一条线）即可。测量完毕后，桥板重新移置到起始段复测，第二次测量值与首次测量时的重复精度应在±0.03 mm/m内，否则需重新测量。

4）数据处理

① 将短边读数值按下式转化为与长边等跨距时的数值 $\delta_{转}$。

$$\delta_{转} = \delta_{读} \times L_{短} / L_{长} \tag{7.5-2}$$

式中，$\delta_{读}$ 为短边测量线中的各点读数值；$L_{短}$ 为短边测量时的桥板跨距；$L_{长}$ 为长边测量时的桥板跨距。

② 将长边测量线的读数值和短边测量线的转化值按测量矩阵列出。其中 $a(0,0)$ 为测量起始点，并将该值设定为零；$a(1,0)$、$a(2,0)$、$a(3,0)$、……、$a(n,0)$ 为短边测量线的转化值，其他为长边测量线的读数值。可以及列：

a (0, 0)　a (0, 1)　a (0, 2)　……　a (0, m)
a (1, 0)　a (1, 1)　a (1, 2)　……　a (1, m)
a (2, 0)　a (2, 1)　a (2, 2)　……　a (2, m)
……　……　……　……　……
a (n, 0)　a (n, 1)　a (n, 2)　……　a (n, m)

③ 将以上矩阵表中的 $a(i,j)$ 值，按测量线逐点累加后，得每点相对于起始点，在水平仪零位面上的高度值 $b(i,j)$：

$b(i,j) = a(i,j)$　（当 $i=0, j=0$ 时）
$b(i,j) = a(i,j) + b(i,j-1)$　（当 $j>0$ 时）
$b(i,j) = a(i,j) + b(i-1,j)$　（当 $i>0, j=0$ 时）

将 $b(0,0)$ 作为起始点，等于 $a(0,0)$，并置零，于是得到以 $b(i,j)$ 为元素的新的矩阵：

b (0, 0)　b (0, 1)　b (0, 2)　……　b (0, m)
b (1, 0)　b (1, 1)　b (1, 2)　……　b (1, m)
b (2, 0)　b (2, 1)　b (2, 2)　……　b (2, m)
……　……　……　……　……
b (n, 0)　b (n, 1)　b (n, 2)　……　b (n, m)

④ 以上述矩阵表中b（0，0）为基点，将其沿长边测量线上的另一角点b（0，m）旋转到与基点等值（为零），得出矩阵长边测量线上各测量点的旋转量 X_j：

$$X_j = -\left[\frac{b(0,m) \times j}{m}\right] \tag{7.5-3}$$

式中，m 为矩阵长向角点的 j 值。

仍以 $b(0,0)$ 为基点，将其沿短边测量线上的另一角点 $b(n,0)$ 旋转到与基点等值（为零），得出矩阵短边测量线上各测量点的旋转量 X_i：

$$X_i = -\left[\frac{b(n,0) \times i}{n}\right] \tag{7.5-4}$$

式中，n 为矩阵短向角点的 i 值。

⑤ 按下式计算出三角点为零时的各测点相对于三角点构成的基准平面的转换值 $C(i,j)$：

$$C(i,j) = b(i,j) + X_i + X_j$$

于是可得以 $C(i,j)$ 为元素的新的矩阵：

C (0, 0)　C (0, 1)　C (0, 2)　……　C (0, m)
C (1, 0)　C (1, 1)　C (1, 2)　……　C (1, m)
C (2, 0)　C (2, 1)　C (2, 2)　……　C (2, m)
……　……　……　……　……
C (n, 0)　C (n, 1)　C (n, 2)　……　C (n, m)

⑥ 按下式计算出三角点为零时该测量平面的平面度误差的近似值 $\Delta_{(三角点法)}$。

$$\Delta_{(三角点法)} = [\, C(i,j)_{max}\ C(i,j)_{min} \,] \times L_{长} \times a \tag{7.5-5}$$

式中，$C(i,j)_{max}$ 为 $C(i,j)$ 矩阵中的最大值；$C(i,j)_{min}$ 为 $C(i,j)$ 矩阵中的最小值；$L_{长}$ 为长边测量线的跨距，mm；a 为精密水平仪的分度值，mm/mm。

由于三角点法计算出的误差值是以矩形的三角点构成的平面为评定基准的，它一般比按最小包容区域法评定的误差值要大。因此，当按上述方法计算出的平面度误差近似值 $\Delta_{(三角点法)}$ 不超过允差值时，此值可以作为该工作台面的平面度误差值。如超过允差值，按照GB/T 1337—1989《平面度误差检测》标准中7.1.3的仲裁要求，应根据矩阵 $C(i,j)$ 的数据特征，重新选定基准平面，按最小条件法（或接近最小条件的最小二乘法，对角线法等）进行数据处理，计算出其平面度误差 $\Delta_{(最小条件)}$，并以此作为该工作台面的平面度误差。

2.2.7 工作台面与X轴运动及Y轴运动之间平行度的检查

GB/T 5291.1—2001G8项规定此项的允差为：对于图7.5-9a和图7.5-9b，在任意300测量长度上为0.015；最大允差值0.04。测量仪器为千分表、平尺和量块。

测量简图见图7.5-9。

检验步骤如下。

1）根据 X 轴和 Y 轴的行程，选择一与其长度相适应的0级平尺，并在平尺下工作面两端的白塞尔点上用等高量块支承后，沿被测轴的运动方向，将其置于机床工作台的中间

位置上。

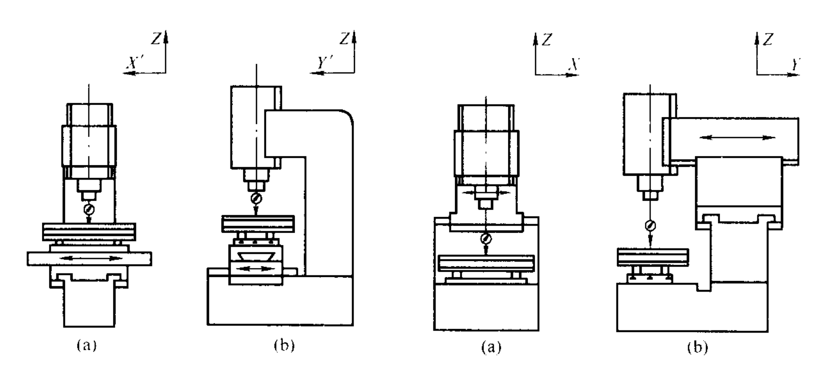


图 7.5-9　工作台面与 X、Y 轴运动间平行度的测量简图

2）非测量轴置于行程中间，千分表固定在主轴头上。调整平尺与千分表的位置，使得被测轴全行程移动时，千分表测头均能触及平尺工作面。

3）被测轴置于行程的一端，千分表测头触及平尺工作面的一端，记下千分表的读数（或置零）。被测轴沿全行程移动，观测千分表示值，读数。

4）此项测量也可以直接在工作台面上进行。测量时，非测量轴与千分表的装夹位置以及测量数据的采集均与上述方法一样。只是千分表测头直接触及机床工作台面，而非平尺工作面。一般情况下，测量 *X* 轴时，千分表测头直接触及工作台 *Y* 方向的中间位置（注意避开 T 型槽），测量 *Y* 轴时，千分表测头触及工作台面 *X* 方向中间位置。

5）数据处理　对于测量长度不超过 300 mm 的运动轴，千分表读数的最大差值就是工作台面对该轴运动的平行度误差。对于测量长度超过 300 mm 的运动轴，如果全行程上千分表读数的最大差值不超过允差值 0.015，此值可作平行度误差值。如果全行程上千分表读数的最大差值超过允差值 0.015，则应分段取点读数，计算出任意 300 mm 测量长度上的平行度误差值和全行程上的平行度误差值。两者应分别在允差 0.015 和 0.04 范围内，否则为不合格。

2.2.8　工作台基准 T 形槽或基准面在 *X* 方向上的直线度的检查

GB/T 5291.1—2001 G9 项规定了该项的允差为：在任意 500 测量长度上为 0.02；最大允差值 0.05。测量仪器采用平尺、千分表、十字角尺，也可采用自准直仪等光学仪器或其他仪器。

测量简图见图 7.5-10。

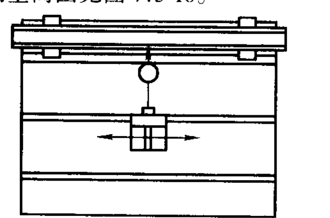
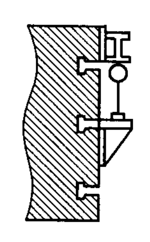



图 7.5-10　工作台基准 T 形槽的直线度测量简图

检验步骤如下。

1）根据机床工作台基准 T 形槽（或基准面）在 *X* 方向上的长度选择一与其相适应的 0 级或 0 级以上精度的平尺，并沿 *X* 方向，使平尺工作面垂直于工作台面，并置于工作台基准 T 形槽（或基准面）的一侧，此时工作台（若可移动）应置于行程的中间位置。

2）十字角尺置于基准 T 形槽内（或基准面上），其基准面应与工作台基准 T 形槽侧面（或基准面）贴合。千分表固定在十字角尺上。

3）调整平尺与千分表的位置，使十字角尺在基准 T 形槽内（或基准面上）全行程移动时，千分表测头均能触及平尺工作面。

4）在水平面内，轻微转动平尺，使得十字角尺置于基准 T 形槽（或基准面）两端时，千分表读数相等。全行程移动十字角尺，读取千分表读数。

5）数据处理　当工作台基准 T 形槽（或基准面）的测量长度不超过 500 mm 时，千分表在全行程移动时的最大读数差，即为该工作台基准 T 形槽（或基准面）在 *X* 方向上的直线度误差。

当基准 T 形槽（或基准面）的测量长度超过 500 mm 时，如千分表在全行程上的读数未超过允差值 0.02，此值也可作为其直线度误差；否则，应分段取点读数，取点数在 500 mm 长度内不少于 5 点，按 2.2.1 所述计算法或作图法，获得该工作台基准 T 形槽（或基准面）在任意 500 mm 测量长度上的最大直线度误差值和全行程上的直线度误差值。

2.2.9　工作台基准 T 形槽或基准面与 *X* 轴运动之间的平行度的检查

GB/T 5291.1—2001 G10 项规定此项的允差为：在任意 300 测量长度上为 0.015；最大允差值 0.04。测量仪器为千分表。

测量简图见图 7.5-11。

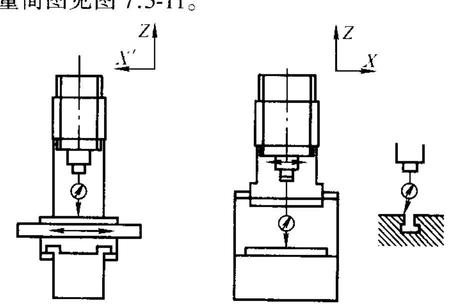


图 7.5-11　工作台基准 T 形槽与 X 轴运动间的平行度的测量简图

检验步骤如下。

1）将 *Y* 轴置于行程中间，千分表固定在主轴头上。

2）*X* 轴运动至行程一端的极限位置，千分表测头在相应的端头触及工作台基准 T 形槽（或基准面）的测量面上，将千分表置零。全行程移动 *X* 轴，读取千分表读数，如 *X* 轴行程大于 300 mm，应分段取点读数，取点数在 300 mm 长度内不少于 5 点。

3）当 *X* 轴运动行程小于工作台基准 T 形槽（或基准面）的测量长度时，也应分段取点读数，取点数在 300 mm 长度内不少于 5 点。具体方法为：先在 *X* 轴的全行程上测量出工作台基准 T 形槽（或基准面）一端至 *X* 轴满行程长度上各点的读数值；再将 *X* 轴移动到起始端，在基准 T 形槽（或基准面）分段取点的第二点上重新对表，将其示值调整到第一次测量时的读数，再全行程移动 *X* 轴，测量该测量段上各点的

千分表读数。依此类推，直至工作台基准 T 形槽（或基准面）全测量长度上的测量点全部测量完毕。将数次测量中，同一测点的各次读数取平均值，作为该点的最终读数。

4）数据处理 当测量长度不超过 300 mm 时，千分表读数的最大差值即为其平行度误差。当测量长度超过 300 mm，但千分表全程的最大读数差未超过 0.015 时，此值也可以作为该工作台基准 T 形槽（或基准面）与 X 轴运动间的平行度误差；否则，应根据上述分段取点读数的方法，分别计算出任意 300 测量长度上的最大读数差和全测量长度上的最大读数差，以此作为任意 300 测量长度上的平行度误差和全部测量长度上的平行度误差。

2.2.10 电极安装板与 *X* 轴运动及 *Y* 轴运动之间平行度的检查

GB/T 5291.1—2001 G11 项规定此项的允差为：对于 a）和 b），在任意 200 mm 测量长度上为 0.015。测量仪器为千分表。

测量简图见图 7.5-12。

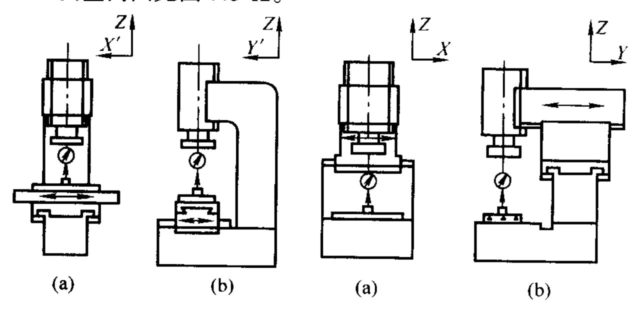


图 7.5-12 电极安装板与 X、Y 轴运动间平行度的测量简图

检验步骤如下。

1）机床主轴置于行程中间，主轴头置于行程中间并锁紧。

2）X 轴、Y 轴置于行程中间，千分表固定在工作台中央电极安装板中间正下方处，使千分表测头分别沿 X 轴或 Y 轴垂直触及电极安装板之下底面离边沿约 5 mm 处，将千分表示值置零。分别移动 X 轴和 Y 轴，读取千分表示值。

3）数据处理 对于尺寸不超过 200 mm × 200 mm 的电极安装板，千分表在 X 方向的最大读数差即为其与 X 轴运动之间的平行度误差，千分表在 Y 方向的最大读数差为其与 Y 轴运动之间的平行度误差。

对于电极安装板任一边的尺寸大于 200 mm 时的测量，应分段取点读数，计算出安装板在 X 轴或 Y 轴方向上，在任意 200 测量长度上的平行误差，以其中最大值作为测量结果。

2.2.11 旋转轴轴线的径向跳动检查

GB/T 5291.1—2001 G12 项规定此项的允差为：（a）接近旋转轴轴端处为 0.005；（b）距 a 点 100 mm 处为 0.01。测量仪器为千分表和检验棒。

测量简图见图 7.5-13。

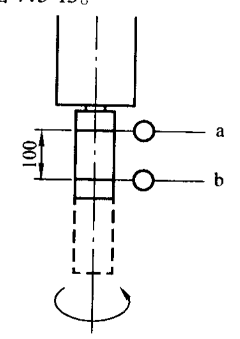


图 7.5-13 旋转轴轴线的径跳测量简图

检验步骤如下。

1）根据旋转轴连接面的形式，选择一与其相适应的检验棒，并将其连接在旋转轴上。此时，主轴头应位于其行程的中间位置，并锁紧。

2）千分表固定在机床的一个固定部件上，千分表测头按大致通过检验棒中心的方向垂直触及检验棒工作面靠近旋转轴端部的位置。转动旋转轴两转以上，读出千分表上的最大读数差 a_1，此 a_1 即为旋转轴在 a 处该方位上的径向跳动。再将千分表测头移至距 a 点 100 mm 的 b 处，按同样方法测量出径向跳动 b_1。

3）将检验棒在相隔 90°的 4 个位置上，依次与旋转轴连结，依次得出读数值 a_1、b_1，a_2、b_2，a_3、b_3，a_4、b_4。以 a_1、a_2、a_3 和 a_4 的平均值作为该旋转轴在 a 处的径向跳动误差；以 b_1、b_2、b_3 和 b_4 的平均值作为该旋转轴在 b 处的径向跳动误差。

2.2.12 旋转轴和 *Z* 轴运动间的平行度的检查

GB/T 5291.1—2001 G13 项规定此项的允差为在 ZX 平面内和在 ZY 平面内均为：在任意 100 测量长度上为 0.01。测量仪器为千分表和检验棒。

测量简图见图 7.5-14。

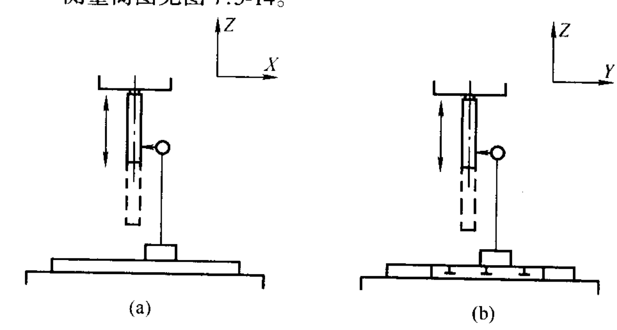


图 7.5-14 旋转轴与 Z 轴运动间的平行度的测量简图

检验步骤如下。

1）根据 Z 轴运动的行程和 Z 轴运动时所允许的最小安装空间，选择一长度与其相适应的检验棒，并将其安装在旋转轴上。

2）W 轴置于行程的上端并锁紧，Z 轴置于行程的下端。千分表固定在工作台上。在沿 X 方向测量时，千分表测头在 ZX 平面内垂直触及检验棒的上端工作面，轻轻移动 Y 轴，在千分表示值出现拐点处停止。在沿 y 方向测量时，千分表测头在 ZY 平面内垂直触及检验棒的上端工作面，轻轻移动 X 轴，在千分表示值出现拐点处停止。转动旋转轴，读取千分表读数变化的中间值。

3）向上移动 Z 轴，分段取点读数，取点数在检验棒全长上不少于 5 点。如检验棒长度小于 Z 轴行程，则需作接表处理，直至 Z 轴全行程测量完毕。

4）将旋转轴转动 180°，再同样检测一次，以各测量平面内各测量点的两次读数的平均值为各测量点的读数。

5）数据处理 当 Z 轴行程不超过 100 mm 时，上述千分表读数的最大差值即为该旋转轴在该平面内对 Z 轴运动间的平行度误差。当 Z 轴行程超过 100 mm 时，应根据上述读数分段计算出任意 100 mm 测量长度上的误差值，取其中最大值作为该项平行度误差。

2.2.13 主轴与工作台之间的侧向间隙的检查

GB/T 5291.1—2001G14 项规定此项的允差为：对于 X 方向和 Y 方向，对于力 F 为 0.04。作用力 F 为该机床允许最大电极重量的 10%，且不超过 100 N。测量仪器为千分表和测力计或弹簧秤。

测量简图见图 7.5-15。



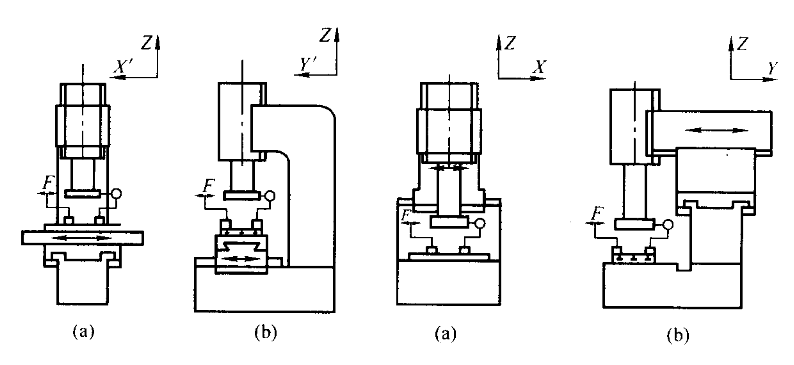


图 7.5-15 主轴与工作台间的侧隙测量简图

检验步骤如下。

1）主轴头位于行程中间位置并锁紧，主轴伸出至最大位置；*X* 轴、*Y* 轴位于行程中间位置，千分表固定在工作台上。

2）使千分表测头沿 *X* 方向（或 *Y* 方向）垂直触及电极安装板之一侧面的中间。施力夹具固定在工作台上，测力计或弹簧秤安装在施力夹具上。

3）由千分表测头相对的一面从工作台向电极安装板施压力 *F*，记下千分表读数。再由千分表测头所在的一面向电极板安装板施加同样大小的力，并记下千分表读数。上述两次读数的差值，即为主轴与工作台之间在该方向上的间隙。

4）若无施力夹具，从可操作性来看，允许作用力的施加者站在地面上，通过测力计或弹簧秤对电极安装板按 *X* 方向或 *Y* 方向施加正反两个方向的力 *F*，读取千分表正反两次的读数差，作为其侧向间隙的近似值。

2.3 电火花成形机定位精度检验

2.3.1 手动操纵轴的轴进给机构间隙的检查

GB/T 5291.1—2001 P1 项对此项目规定了 *X* 轴、*Y* 轴和 *Z* 轴内三根轴的允差均为 0.03。测量仪器为千分表和量块。

测量简图见图 7.5-16。

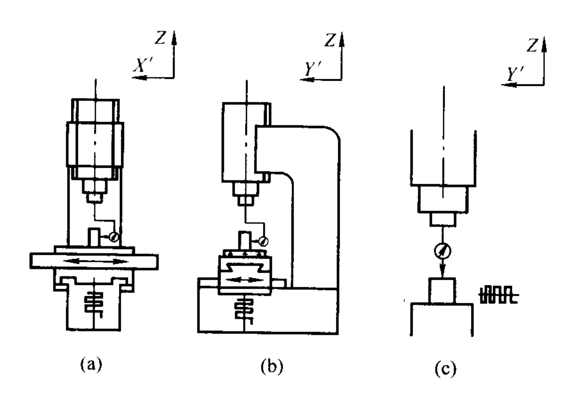


图 7.5-16 手动轴的轴进给机构间隙的检查简图

检验步骤如下。

1）将千分表固定在主轴末端或电极安装板上，千分表的测量轴线应与被测轴平行；量块固定在工作台适当的位置上，使得量块的工作面与被测轴线垂直，且当被测轴进给运动时，千分表测头能触及量块工作面。

2）摇动手柄，低速进给移动被测轴，直到千分表测头触及量块工作面，适量压表。记下手柄的位置（手轮的刻度值或数显表示值），千分表读数或置零。手柄再适当进给一点（进给量要大于间隙值，但不能超过千分表量程），然后退回到手柄初始位置，记下千分表读数，获取读数差值。

3）在该轴的同一位置重复检查 5 次，取读数差值的平均值作为该位置的间隙。此项检查应在被测轴的两端及中间处共三个位置进行，三处的最大值作为该轴的间隙。

2.3.2 数控直线轴运动的定位精度，重复定位精度和定位反向差值（失动量）的检查

GB/T 5291.1—2001 P2、P3、P4 项对数控直线轴规定了 *X* 轴、*Y* 轴及 *Z* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值（失动量）的允差，见表 7.5-4。

表 7.5-4 数控 *X*、*Y*、*Z* 轴运动的定位精度、重复定位精度及定位反向差值的允差 mm

	测量轴	X、Y			Z		
	允差	测量长度			测量长度		
		≤500	≤1 000	≤2 000	≤250	≤500	≤1 000
标准要求	双向定位精度 A	0.011	0.015	0.019	0.009	0.011	0.015
	单向重复定位精度 R↓和R↑	0.005	0.007	0.009	0.004	0.005	0.007
	双向重复定位精度 R	0.009	0.012	0.015	0.007	0.009	0.012
	轴的反向差值（失动量） B	0.008	0.010	0.013	0.006	0.008	0.010
	平均反向差值（失动量） $\bar{B}$	0.004	0.005	0.006	0.003	0.004	0.005
	双向定位系统偏差 E	0.006	0.007	0.008	0.005	0.006	0.008
	轴的双向平均定位偏差的范围 M	0.002	0.003	0.004	0.002	0.002	0.003

上述各项误差的检测，一般采用激光测量仪进行，也可使用长度基准线纹尺和读数显微镜测量。采用激光测量仪的测量简图见图 7.5-17。

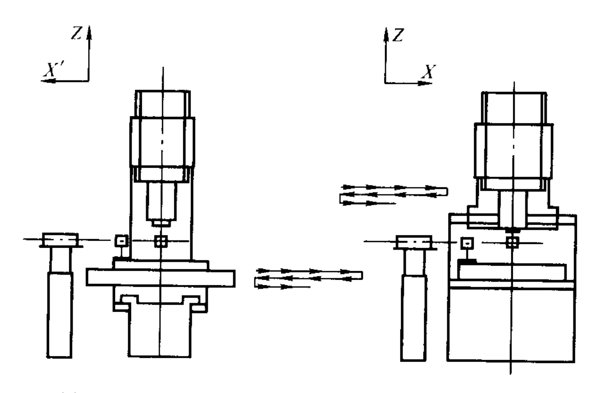
（1）激光干涉仪法简介

激光测量仪器中用得较多的是激光干涉仪，这也是目前测量机床数控轴定位精度的比较理想的仪器，具有对温度、湿度、气压等参数补偿的功能。由于激光干涉仪使用激光波长作为长度标准，因此，被测机床所处环境的振动要小，空气中不得有影响仪器正常使用的灰尘、油漆、飞虫等，以免激光束被挡中断。

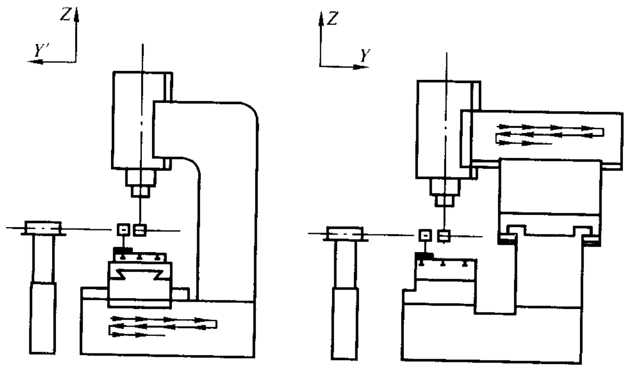
1）按照仪器使用说明书的要求，在被测机床周边的适当位置正确安装激光头，计算显示器（或电脑显示器），湿度、气压传感器和温度传感器。材料温度传感器一般应安装在被测轴的两端，空气温度传感器尽量置于光路中间。

2）接通电源，待激光稳频后，查看环境温度 *T*，湿度 *H* 和气压 *P*，以及材料的线胀系数、激光波长修正系数等是否正确。如显示有异常，或有故障提示出现，应检查各传感器的连接是否正确、牢靠。

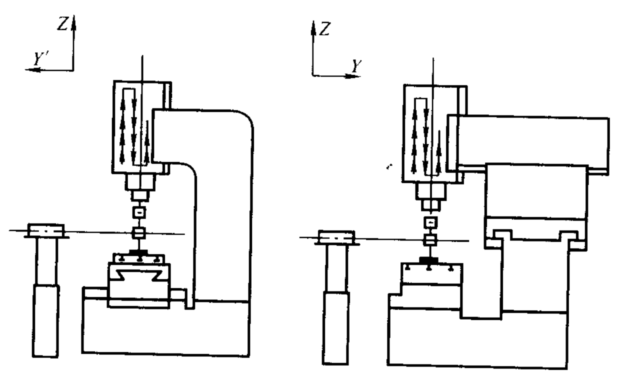
3）将机床被测轴运动到其行程一端的极限位置，在机



(a) X 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值（失动量）的检查简图



(b) Y 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值（失动量）的检查简图



(c) Z 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值（失动量）的检查简图

图 7.5-17　数控直线轴运动的定位精度检查简图

床上适当的固定部位及与该被测轴相关的运动部件上分别固定上一只仪器专用的反射器和干涉镜。注意：干涉镜应位于反射镜与激光头之间。

4）调整激光头、干涉镜和反射镜的位置，快速移动被测轴，使被测轴与激光束平行，显示器上光强指标线位置适度，并在被测轴运动的近端与远端基本一致。

5）被测轴找零、仪器显示值置零后即可进行测量。

（2）长度基准线纹尺和读数显微镜法简介

采用此法测量时，可选用量程适当大于机床被测轴行程的二等标准以上精度的金属线纹尺。该线纹尺应具有毫米刻度数值；具有量程两端与测量线重合的调平标线；具有平行于测量轴线的上面和侧面基准面；具有制造材质或线膨胀系数标记。

读数显微镜的最小刻度示值应不大于 0.001 mm，其测量范围应与线纹尺相匹配，即满量程刻度值为 1.000 mm。

1）将线纹尺固定在工作台的适当位置上，使读数显微镜能在被测轴全行程运动中对线纹尺进行瞄准。在固定线纹尺时，应将两等高块放置在其两端的贝塞尔点上支承。

2）快速移动被测轴，用千分表观测，轻微转动线纹尺（水平方向上），使线纹尺的基准侧面与被测轴平行。如果机床的行程允许，也可通过显微镜观察线纹尺两端的标线将其调平。

3）利用适当夹具将读数显微镜安装在主轴末端（或电极安装板上）。读数显微镜的安装，应使其物镜至线纹尺刻线面的距离可以微量调整，以使线纹尺的毫米刻线清晰地显示在目镜分划板上。

4）调整显微镜位置以及物镜与线纹尺之间的距离，使线纹尺上相邻两条毫米刻线的影像准确地落入目镜分划板上 0 双刻线之间和 10 双刻线之间，以消除放大倍数不准带来的误差。

5）被测轴找零，读数显微镜调零后即可进行测量。

由于符合条件的长度基准线纹尺已经很少，同时该方法难以用于对 Z 轴运动的测量上，因此在实际检测中很少使用此方法。

（3）检验条件

1）检测场地周围环境的振动要小，温度要稳定，空气要清洁，不能有可见的灰尘、油漆飞沫、飞虫等。

2）被检机床和检测器具应在检测环境中放置足够长的时间，以确保在检测前达到热稳定状态。

3）被检机床应完成装配并经充分运转。在开始检测其运动轴的定位精度和重复定位精度之前，机床的调平、几何精度和功能检验都应完全符合要求。

4）非检测轴置于中间。如不能置于中间，应在检验单上标明其位置。

（4）检验步骤

数控直线轴运动精度的检测，实际上是检测机床直线运动轴执行数控系统指令的偏差程度。要检测数控轴的定位精度，首先要给数控系统确定若干个有代表性的目标值，再通过测量仪器测得机床运动到实际位置时，与目标值的偏差。因此，当架设好检测的仪器设备后，检验步骤如下。

1）确定被测轴运动的目标位置　按照 GB/T 17421.2 的规定，在行程至 2 000 mm 的线性轴上，每 1 000 mm 至少选择 5 个目标位置，并且在全行程上至少也应有 5 个目标位置。每个目标位置的数值可自由选择，一般按下列公式进行：

$$P_i = (i - 1)P + r \tag{7.5-6}$$

式中，i 为现行目标位置序号；P 为目标位置的间距，使测量行程内的目标位置之间有均匀的间距；其取值一般为被测轴丝杆螺距的整数倍；r 为在各目标位置取不同的值，获得全测量行程上目标位置的不均匀间隔，以保证周期误差（如丝杆导程、丝杆轴承的轴向窜动等）被充分采样。

r 值可以在 0.000 ~ 9.999 之间取随机数，也可按下式选取：

$$r = T/m \times i \tag{7.5-7}$$

式中，T 为该测量轴丝杆的螺距；m 为目标总数；i 为现行目标位置序号。

按上式选取时，如其十分位、百分位、千分位为零，应补上随机数。

在确定目标位置的第一点和最后一点时，应考虑由行程的两端点向行程内收缩适当的距离，以使各目标位置均能从两个方向趋近。

2）编制数控轴循环运动程序　目标位置确定后，编制机床数控指令程序，使被测轴按规定的循环运动要求，运动到一系列目标位置。

在编制程序时，应使被测轴在目标位置内运动的速度

同一。

按 GB/T 17421.2—2000 的规定，线性数控轴定位精度的测量应按标准循环（见图 7.5-18）在所有目标位置上进行。每个目标位置在每个方向上应测量5次。特殊情况下（如重型机床）可按阶梯循环（见图 7.5-19）进行。

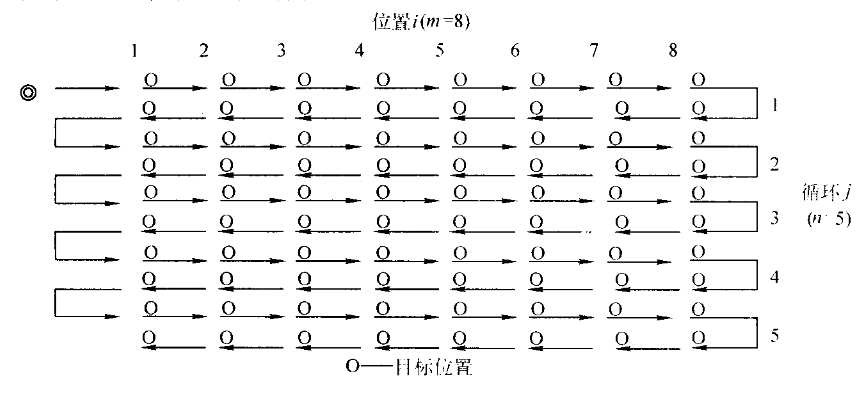


图 7.5-18　标准检验循环

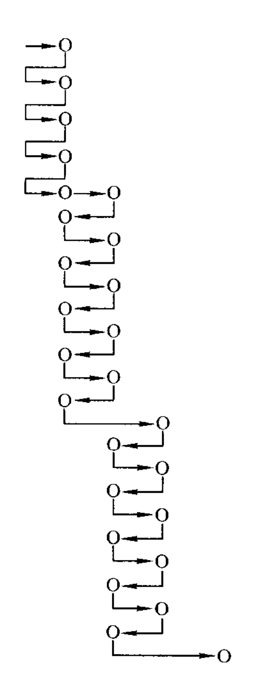


图 7.5-19　阶梯检验循环

在检验中，使用阶梯循环与使用标准检验循环得到的结果可能不同，使用标准循环时，从相反方向趋近两端点目标位置的时间间隔相差很大。使用阶梯循环时，从任一方向趋近每个目标位置的时间间隔较短，但第一点和终点目标位置的测量时间间隔较长。因此，按照标准循环的测量可反应热效应。在检验期间，沿轴线的各个目标位置的热效应不同。测量中热效应在反向差值 B 和重复定位精度 R 上可能是明显的。就阶梯循环来说，热效应在双向平均位置偏差的范围 M 上也许是明显的，而机床的热性能对反向差值和重复定位精度影响很小。

3）数据采集与记录　在每个目标位置，检测人员读取并记录仪器所显示的被测轴所到达的实际位置 P_{ij}，或由仪器自动输出这个位置值。

4）测量数据的处理与结果的评定

① 计算位置偏差 X_{ij}

$$X_{ij}=P_{ij}-P_i$$

② 计算单向平均位置偏差 $\overline{X}_i\uparrow$ 和 $\overline{X}_i\downarrow$

$$\overline{x}_i\uparrow=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{ij}\uparrow,\overline{X}_i\downarrow=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{ij}\downarrow$$

③ 计算标准不确定度 $S_i\uparrow$ 和 $S_i\downarrow$

$$S_i\uparrow=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}\uparrow-\overline{x}_i\uparrow)^2},$$

$$S_i\downarrow=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}\downarrow-\overline{x}_i\downarrow)^2}$$

④ 计算极限偏差

$\overline{x}_i\uparrow+2S_i\uparrow$ 和 $\overline{x}_i\uparrow-2S_i\uparrow$，$\overline{x}_i\downarrow+2S_i\downarrow$ 和 $\overline{x}_i\downarrow-2S_i\downarrow$

⑤ 计算单向重复定位偏差 $R_i\uparrow$ 和 $R_i\downarrow$

$$R_i\uparrow=4S_i\uparrow,R_i\downarrow=4S_i\downarrow \tag{7.5-8}$$

其最大值即 $R\uparrow=\max(R_i\uparrow)$ 和 $R\downarrow=\max(R_i\downarrow)$ 作为轴的该方向的重复定位精度。

⑥ 计算反向差值 B_i 和平均反向差值 $\overline{B}$

$$B_i=X_i\uparrow-X_i\downarrow,\overline{B}_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}B_i \tag{7.5-9}$$

B_i 的绝对值的最大值 $\max[|B_i|]$ 作为轴的反向差值 B。

⑦ 计算双向重复定位精度 R_i

$$R_i=\max[2S_i\uparrow+2S_i\downarrow+|B_i|;R_i\uparrow;R_i\downarrow] \tag{7.5-10}$$

其最大值 $R=\max[R_i]$ 作为轴的双向重复定位精度。

⑧ 计算双向平均位置偏差 $\overline{x}_i$

$$\overline{x}_i=\frac{\overline{x}_i\uparrow+\overline{x}_i\downarrow}{2}$$

⑨ 计算定位精度

单向定位精度

$$A\uparrow=\max[\overline{x}_i\uparrow+2S_i\uparrow]-\min[\overline{x}_i\uparrow-2S_i\uparrow]$$

$$A\downarrow=\max[\overline{x}_i\downarrow+2S_i\downarrow]-\min[\overline{x}_i\downarrow-2S_i\downarrow]$$

双向定位精度

$A=\max[x_i\uparrow+2S_i\uparrow;\ x_i\downarrow+2S_i\downarrow]-\min[x_i\uparrow-2S_i\uparrow;\ x_i\downarrow-2S_i\downarrow]$

⑩ 计算定位系统偏差 E

$$E\uparrow=\max[\overline{x}_i\uparrow]-\min[\overline{x}_i\uparrow]$$

$$E\downarrow=\max[\overline{x}_i\downarrow]-\min[\overline{x}_i\downarrow]$$

$$E=\max[\overline{x}_i\uparrow;\overline{x}_i\downarrow]-\min[\overline{x}_i\uparrow;\overline{x}_i\downarrow]$$

⑪ 计算轴的双向平均定位偏差的范围 M

$$M=\max[\overline{x}_i]-\min[\overline{x}_i]$$

5）检测结果的表达　数控直线轴的定位精度，如前所述，GB/T 5291.2—2001 给出了7项基本要求，且各项精度相互关联，互有影响。为了便于计算和分析，最终结果一般可采用计算列表和图解法并用的方式。表 7.5-5 给出了激光干涉仪检测原始记录和位置偏差举例；表 7.5-6 给出了检验结



果的计算列表举例。图 7.5-20、图 7.5-21、图 7.5-22 给出了　　检验结果的图解，供参考。

表 7.5-5　激光干涉仪　检测原始记录及位置偏差示例

制造单位：

机床型号、名称和出厂编号：　　　　测量轴：X

检验日期：　　　　检验人员：

气压 $P=765.5$　　温度 $T=22℃$　　空气湿度 $H=72$　　系数 $C=729.2$

序号	目标位置 /mm	1↓		1↑		2↓		2↑		3↓		3↑		4↓		4↑		5↓		5↑	
		实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm	实际位置 /mm	偏差 /μm
1	3.167	3.167 6	0.6	3.166 6	-0.4	3.167 3	0.3	3.16 62	-0.8	3.165 9	-1.1	3.165 1	-1.9	3.165 6	-1.4	3.165 2	-1.8	3.165 9	-1.1	3.165 2	-1.8
2	81.391	81.393 8	2.8	81.39 40	3.0	81.39 39	2.9	81.3 932	2.2	81.39 30	2.0	81.392 0	1.0	81.391 5	0.5	81.39 04	-0.6	81.39 07	-0.3	81.390 4	-0.6
3	159.536	159.53 81	2.1	159.5 373	1.3	159.5 382	2.2	159. 537 4	1.4	159.5 371	1.1	159.53 66	0.6	159.53 71	1.1	159.5 367	0.7	159.5 370	1.0	159.53 67	0.7
4	245.773	245.77 62	3.2	245.7 756	2.6	245.7 758	2.8	245. 775 3	2.3	245.7 749	1.9	245.77 36	0.6	245.77 51	2.1	245.7 738	0.8	245.7 755	2.5	245.77 43	1.3
5	317.945	317.94 64	1.4	317.9 455	0.5	317.9 470	2.0	317. 946 2	1.2	317.9 468	1.8	317.94 60	1.0	317.94 70	2.0	317.9 462	1.2	317.9 471	2.1	317.94 63	1.3

表 7.5-6　检验结果计算列表示例

制造单位：

机床型号、名称和出厂编号：　　　　测量轴：X

检验日期：　　　　检验人员：

气压 $P=765.5$　　温度 $T=22℃$　　空气湿度 $H=72$　　系数 $C=729.2$

		1		2		3		4		5	
目标位置 P_i/mm		3.167		81.391		159.536		245.773		317.945	
趋近方向		↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
位置偏差 /μm	$J=1$	0.6	-0.4	2.8	3.0	2.1	1.3	3.2	2.6	1.4	0.5
	2	0.3	-0.8	2.9	2.2	2.2	1.4	2.8	2.3	2.0	1.2
	3	-1.1	-1.9	2.0	1.0	1.1	0.6	1.9	0.6	1.8	1.0
	4	-1.4	-1.8	0.5	-0.6	1.1	0.7	2.1	0.8	2.0	1.2
	5	-1.1	-1.8	-0.3	-0.6	1.0	0.7	2.5	1.3	2.1	1.3
单向平均位置偏差 X_i/μm		-0.54	-1.34	1.58	1.00	1.50	0.94	2.50	1.52	1.86	1.04
标准不确定度 S_i/μm		0.92	0.69	1.42	1.62	0.60	0.38	0.52	0.89	0.28	0.32
$2S_i$/μm		1.84	1.38	2.85	3.25	1.19	0.76	1.05	1.79	0.56	0.64
X_i-2S_i/μm		-2.38	-2.72	-1.27	-2.25	0.31	0.18	1.45	-0.27	1.30	0.40
X_i+2S_i/μm		1.30	0.04	4.43	4.25	2.69	1.70	3.55	3.31	2.42	1.68
单向重复定位偏差 $R_i=4S_i$/μm		3.67	2.77	5.69	6.50	2.38	1.51	2.10	3.57	1.12	1.28
反向差值 B_i/μm		-0.80		-0.58		-0.58		-0.98		-0.82	
双向重复定位精度 R_i/μm		4.02		6.68		2.51		3.81		2.02	
双向平均位置偏差 X_i/μm		-0.94		1.29		1.22		2.01		1.45	

轴向偏差	单向↓	单向↑	双向
反向差值 B/mm	/	/	0.001 0
平均反向差值 B/mm	/	/	-0.000 7
双向平均位置偏差的范围 M/mm	/	/	0.003 0
定位系统偏差 E/mm	0.003 0	0.002 9	0.003 8
重复定位精度 R/mm	0.005 7	0.006 5	0.006 7
定位精度 A/mm	0.006 8	0.007 0	0.007 2

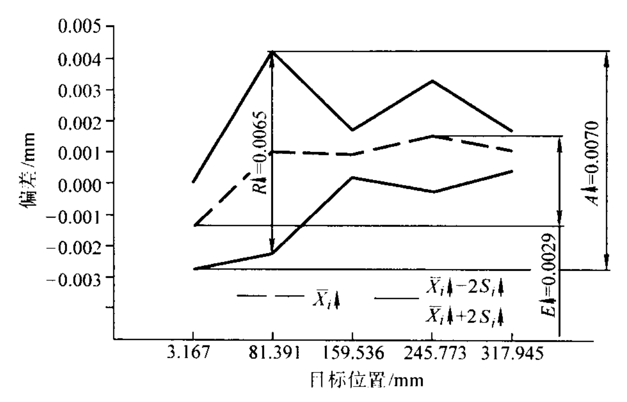


图 7.5-20　单向定位精度和重复定位精度表达图

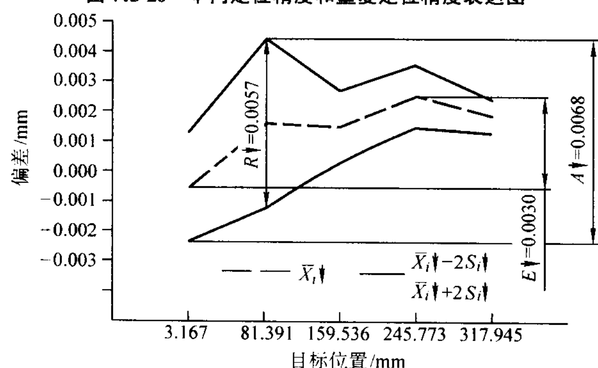


图 7.5-21　单向定位精度和重复定位精度表达图

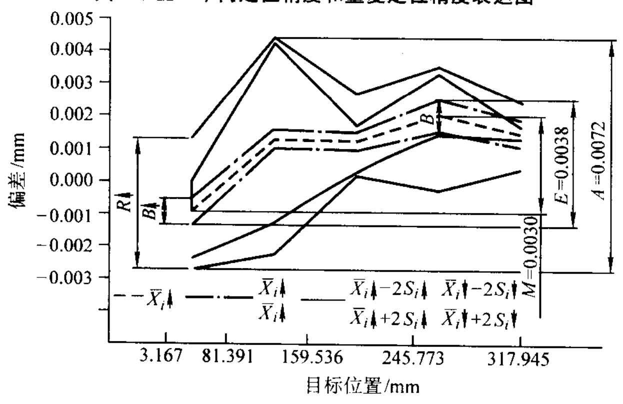


图 7.5-22　双向定位精度和重复定位精度表达图

2.3.3　数控旋转轴的定位精度、重复定位精度和反向差值（失动量）的检查

GB/T 5291.1—2001P5 项对数控旋转轴规定了 C 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值的允差，见表 7.5-7。

表 7.5-7　数控 *C* 轴运动的定位精度、重复定位精度及定位反向差值的允差

	允差/（″）		
标准要求	双向定位精度	A	80
	单向重复定位精度	R↓和↑R	40
	双向重复定位精度	R	55
	轴的反向差值（失动量）	B	40
	平均反向差值（失动量）	$\overline{B}$	20
	双向定位系统偏差	E	40
	轴的双向平均定位偏差的范围	M	25

上述各项误差，可用自准直仪和多面棱体组合使用的方法进行测量，有条件时也可采用旋转编码器和带分度盘的激光角度干涉仪进行测量。

测量简图见图 7.5-23。

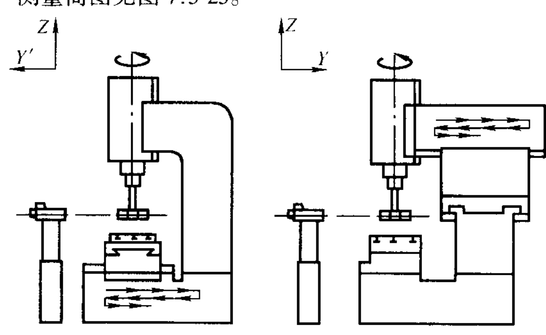


图 7.5-23　数控旋转轴运动的定位精度检查简图

（1）自准直仪和多面棱体组合使用方法简介

采用此法检测旋转轴的定位精度，自准直仪一般需选择测量范围为 10′，目镜分划板的分度值为 1′，测微读数鼓轮的分度值为 1″的自准测微平行光管。多面棱体（又叫多棱镜）可选用面数为 4、6、8、10、12、24、36、72 面等。其中 12、24、和 36 面体使用较为广泛。

测量前，先将一专用芯轴（外径与多面棱体基准孔为间隙配合，配合间隙≤0.01）安装在旋转轴的端部。快速转动旋转轴，用千分表测量专用芯轴相对于旋转轴的径向跳动，应保证其跳动量≤0.01。然后将选用的多面棱体安装在已调整好的芯轴上。

架设自准直仪，调整自准直仪与多面棱体的相对位置，直到在自准直仪的目镜视场中清楚地看到由多面棱体反射到目镜分划板上的影像。数控旋转轴置零。设有绝对零位的旋转轴，应先找绝对零，再找影像，读数鼓轮对零，影像套刻线。至此，仪器安装调整完毕，可以进行测量。使用旋转编码器和带分度盘的激光干涉仪测量数控旋转轴的定位精度，参见仪器的使用说明书和有关手册，这里不再赘述。

（2）检验步骤

数控旋转轴运动的检验步骤除了被测轴运动目标位置的确定因使用仪器的限制而有所不同外，其他如循环指令程序，测量数据的采集，数据处理与结果的评定，检测结果的表达等均与数控直线轴运动基本相同，需说明之处如下。

1）使用旋转编码器和带分度盘的激光干涉仪测量时，测量目标位置的选择原则上与数控直线轴运动相同，在 GB/T 5291.1—2001 标准中规定了目标位置数应至少测量 4 个目标位置，如 0°、90°、180°和 270°。对于不同测量行程范围的回转轴的目标位置数，在 GB/T 17421.2—1998 标中作了规定，见表 7.5-8（主要位置 0°、90°、180°和 270°应包含在内）。

表 7.5-8　回转轴的目标位置数

测量行程	最少目标位置数
≤90°	3
>90°≤180°	5
>180°	8

2）当用自准直仪和多面棱体进行测量时，目标位置的选择受多面棱体的分度面数和自准直仪测量范围的限制，无法按照公式 $P_i=(i-1)P+r$ 进行。只能根据多面棱体的面数按均匀间隔选择。其间隔一般大于等于 10°，小于等于 45°。间隔太小，测量时间间隔太长，引入的相关测量误差变大。

3）对角度不封闭的旋转轴，在确定目标位置时，应考虑两端点要留有缩进量，对角度封闭的旋转轴不需考虑。

2.4　电火花成形机加工检验

GB/T 5291.1—2001 M1 项对加工精度规定了精加工孔的间距精度和直径差的检查，允差为：①间距精度，对于 90 和 120 为 0.02；对于对角线（150）为 0.03。② X 方向和 Y 方向的直径差：0.02。

（1）试件的加工

试件简图见图 7.5-24。

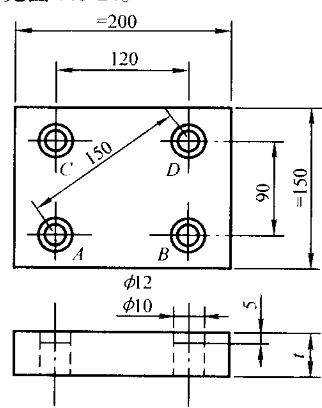


图 7.5-24　电火花成形机加工检验试件简图

1）在被检机床上，用铜圆柱棒电极，在电极不旋转，加工后的表面粗糙度 $R_a \leqslant 2\ \mu m$ 的精加工规准下，对材料为钢的工件进行加工。

2）试件外形尺寸为 $200 \times 150 \times T$，T 推荐为 25，也可用 5 的钢板。若 T 大于 5，必须先加工出沉头孔，使 T 仍保留为 5。

3）试件加工前，应对试件的一侧边（长边）进行精加工，其表面粗糙度 $R_a \leqslant 0.8\ \mu m$，平面度 $\leqslant 0.05$，以作为加工和测量的基准。200×150 两平面也应磨平，以便于加工和测量时稳定装夹。

4）加工形状为四圆孔，孔径为 $\phi 10 \sim 12$，孔间距为 120×90，孔的深度为 5。径向去除量为 0.5（对孔径 $\phi 10$ 的孔，预孔孔径可为 $\phi 9$）。预孔可在工件安装在工作台之前或之后加工，但建议径向去除量一致，即安装时，电极应与预孔基本同心。

（2）试件的检验

1）检验前的准备

① 加工完毕的试件，测量前应对其表面进行清理，尤其是四孔内壁和测量基准面，应去除油污、工作液、灰尘等黏附物。

② 清洗干净的试件，应置于检测仪器附近进行等温，直到被测试件温度与检测仪器温度相差不超过 0.5℃。

2）检测仪器　四孔试件一般采用万能工具显微镜用影像法或光学接触器法测量。也可以在平板上用量块、千分表、方箱和内径量表测量；也可以在三坐标测量机上编程测量，则更为方便可靠。

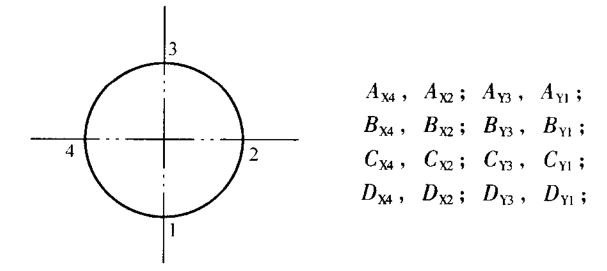
3）万能工具显微镜测量法

① 将试件置于仪器玻璃工作台中央，使其孔间距 120 和 90 分别处于仪器 X 轴和 Y 轴测量行程的中间。

② 将一千分表装在仪器立柱上，其测头触及试件的基准面，沿仪器 X 方向快速移动仪器工作台，调整玻璃工作台左右两个螺钉，使试件基准面与仪器 X 轴运动平行，千分表在试件基准面两端点的读数差不超过 0.001。

③ 无测量基准边的试件，可以用四孔中任意两个同一方向的孔的同侧圆弧顶点的连线作为测量基准，为减少基准的调整误差，一般选用孔距为 120 mm 的任意两孔的外侧圆弧顶点作为测量基准。调整立柱手轮和工作台 X、Y 轴位置，使试件孔所选的基准圆弧顶点落入显微镜视场中。调整物镜焦距，调整目镜视度，直至其影像和分划板米字线清楚地显现在视场中。调整玻璃工作台左右两个螺钉，使得移动工作台时，两基准圆弧顶点的影像相对于米字线中央横线的位置一致（不超过 0.001），此时，测量基准视为调平。

④ 移动工作台的 X 轴和 Y 轴，用半宽压线法分别对沿 X 方向和 Y 方向的每个圆弧顶点进行压线。在读数显微镜上读出其坐标值。



A_{X4}，A_{X2}；A_{Y3}，A_{Y1}；
B_{X4}，B_{X2}；B_{Y3}，B_{Y1}；
C_{X4}，C_{X2}；C_{Y3}，C_{Y1}；
D_{X4}，D_{X2}；D_{Y3}，D_{Y1}；

⑤ 数据处理与计算

孔径：$A_X = |A_{X2} - A_{X4}|$　　$A_Y = |A_{Y1} - A_{Y3}|$

$B_X = |B_{X2} - B_{X4}|$　　$B_Y = |B_{Y1} - B_{Y3}|$

$C_X = |C_{X2} - C_{X4}|$　　$C_Y = |C_{Y1} - C_{Y3}|$

$D_X = |D_{X2} - D_{X4}|$　　$D_Y = |D_{Y1} - D_{Y3}|$

孔径差：在 X 方向 $\max[A_X, B_X, C_X, D_X] - \min[A_X, B_X, C_X, D_X]$

在 Y 方向 $\max[A_Y, B_Y, C_Y, D_Y] - \min[A_Y, B_Y, C_Y, D_Y]$

孔中心位置：$A_{OX} = \dfrac{A_{X4} + A_{X2}}{2}$　　$A_{OY} = \dfrac{A_{Y3} + A_{Y1}}{2}$

$B_{OX} = \dfrac{B_{X4} + B_{X2}}{2}$　　$B_{OY} = \dfrac{B_{Y3} + B_{Y1}}{2}$

$C_{OX} = \dfrac{C_{X4} + C_{X2}}{2}$　　$C_{OY} = \dfrac{C_{Y3} + C_{Y1}}{2}$

$D_{OX} = \dfrac{D_{X4} + D_{X2}}{2}$　　$D_{OY} = \dfrac{D_{Y3} + D_{Y1}}{2}$

孔中心距：$L_{AB} = |B_{OX} - A_{OX}|$　　$L_{AC} = |A_{OY} - C_{OY}|$

$L_{CD} = |D_{OX} - C_{OX}|$　　$L_{BD} = |B_{OY} - D_{OY}|$

中心距误差：$\Delta_{AB} = |L_{AB} - 120|$　　$\Delta_{AC} = |L_{AC} - 90|$

$\Delta_{CD} = |L_{CD} - 120|$　　$\Delta_{BD} = |L_{BD} - 90|$

对角线距离：

$$L_{AD} = \sqrt{(A_{OX} - D_{OX})^2 + (A_{OY} - D_{OY})^2}$$

$$L_{BC} = \sqrt{(B_{OX} - C_{OX})^2 + (B_{OY} - C_{OY})^2}$$

对角线误差：$\Delta_{AD} = |L_{AD} - 150|$　　$\Delta_{BC} = |L_{BC} - 150|$

对于配置了微机的万能工具显微镜，数据处理与计算可由微机自动完成，并打印输出各项检验结果。

4）平台测试法　加工结果也可在平板上用内径千分表、量块和方箱进行测量。

① 在量块专用夹具上用量块组合出尺寸与被测孔直径相近的标准槽 $L_槽$，用内径千分表在标准槽内置零后，测量出四孔在 X 方向和 Y 方向相对于标准槽的偏差值：a_x，a_y，b_x，b_y，c_x，c_y，d_x，d_y，则可得：

孔径：$A_X = L_槽 + a_x$　　$A_Y = L_槽 + a_y$

$B_X = L_槽 + b_x$　　$B_Y = L_槽 + b_y$

$C_X = L_槽 + c_x$　　$C_Y = L_槽 + c_y$

$D_X = L_槽 + d_x$　　$D_Y = L_槽 + d_y$



孔径差：X 方向　$\max[A_X, B_X, C_X, D_X] - \min[A_X, B_X, C_X, D_X]$

Y 方向　$\max[A_Y, B_Y, C_Y, D_Y] - \min[A_Y, B_Y, C_Y, D_Y]$

② 将四孔试件的基准面置于平板上，用杠杆千分表对量块组比较，测量出四孔垂直于基准面方向的圆弧下部顶点至平板工作面的距离。测量示意图见图 7.5-25。

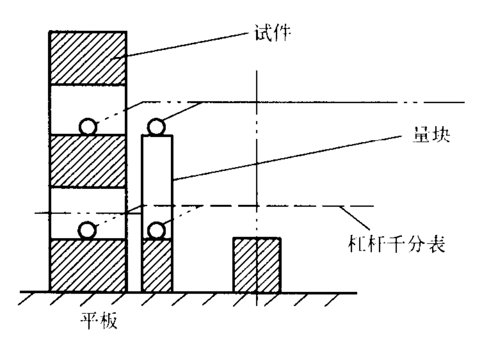


图 7.5-25　平台测试简图

测量时，先用游标卡尺量出四孔下部圆弧顶点至基准面的距离，按卡尺测量出的尺寸组合量块 L_{AB} 和 L_{CD}。将量块组尽量靠近四孔边沿置于平板上，用杠杆千分表在量块组工作面上对零，再将测头置于孔内，在下部圆弧顶点处找出最小值，得出其与量块组之差 L_{ya}、L_{yb}、L_{yc}、L_{yd}。则四孔下部圆弧顶点至基准面的距离分别为：

$$L_{YA} = L_{AB} + L_{ya} \qquad L_{YB} = L_{AB} + L_{yb}$$
$$L_{YC} = L_{CD} + L_{yc} \qquad L_{YD} = L_{CD} + L_{yd}$$

中心距：

$$L_{AC} = L_{YC} + \frac{C_Y}{2} - \left(L_{YA} + \frac{A_Y}{2}\right)$$

$$L_{DB} = L_{YD} + \frac{D_Y}{2} - \left(L_{YB} + \frac{B_Y}{2}\right)$$

中心距误差：

$$\Delta_{AC} = |L_{AC} - 90| \qquad \Delta_{DB} = |L_{DB} - 90|$$

③ 将四孔试件竖放在平板上，其基准面紧贴方箱，且 200×150 面用直角尺校准，使其与平板工作面垂直。用杠杆千分表和量块组按上述同样方法测量出此时四孔下部圆弧顶点与量块组 L_{AC}、L_{BD} 之差 L_{xa}、L_{xb}、L_{xc}、L_{xd}。则四孔下部圆弧顶点至平板工作面的距离分别为：

$$L_{XA} = L_{AC} + L_{xa} \qquad L_{XC} = L_{AC} + L_{xc}$$
$$L_{XB} = L_{BD} + L_{xb} \qquad L_{XD} = L_{BD} + L_{xd}$$

中心距：

$$L_{AB} = L_{XB} + \frac{B_X}{2} - \left(L_{XA} + \frac{A_X}{2}\right)$$

$$L_{CD} = L_{XD} + \frac{D_X}{2} - \left(L_{XC} + \frac{C_X}{2}\right)$$

中心距误差：

$$\Delta_{AB} = |L_{AB} - 120|$$
$$\Delta_{CD} = |L_{CD} - 120|$$

对角线距离：

$$L_{AD} = \sqrt{\left[L_{YD} + \frac{D_Y}{2} - \left(L_{YA} + \frac{A_Y}{2}\right)\right]^2 + \left[L_{XA} + \frac{A_X}{2} - \left(L_{XD} + \frac{D_X}{2}\right)\right]^2}$$

$$L_{BC} = \sqrt{\left[L_{YC} + \frac{C_Y}{2} - \left(L_{YB} + \frac{B_Y}{2}\right)\right]^2 + \left[L_{XB} + \frac{B_X}{2} - \left(L_{XC} + \frac{C_X}{2}\right)\right]^2}$$

对角线误差：

$$\Delta_{AD} = |L_{AD} - 150|$$
$$\Delta_{BC} = |L_{BC} - 150|$$

3　低速走丝电火花线切割机的精度检验

本节介绍低速走丝电火花线切割机产品精度检验的基本方法与检验要点。

3.1　检验要求说明

1）适用标准与项目　适用标准：JB/T 5543—1991《数控低速走丝电火花线切割机　精度》。适用项目：G1 ~ G13、P1 ~ P7。

2）检验某一项目时，不参与或不发生运动的线性运动轴应位于该轴的行程中间位置。运动轴的驱动应该是快速，或正常工况时的进给速度。具有螺距补偿功能和间隙补偿功能的机床，可在使用这些功能的条件下进行检验。

3）当实际测量长度与该标准所规定的长度不同时，允差值可根据 GB/T 17421.1—1998 标准中“2.3.1.1 计量单位和测量范围”的要求进行折算，折算后允差值修约至三位小数（以 mm 为单位）。折算结果小于 0.001 mm 时，仍按 0.001 mm 计。

对于主参数（工作台行程）符合 GB/T 7925—1987《电火花线切割机参数》标准所规定的系列尺寸的低速走丝电火花线切割机的各项几何精度检验项目（G1 ~ G13）的允差折算可见表 7.5-9。

表 7.5-9　JB/T 5543—1991 标准几何精度检验项目允差折算一览表　　mm

序号＼允许＼行程	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600
G1				0.008	0.010	0.013	0.016	0.020	0.025	0.032	0.040	0.050	0.064
G2	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.012	0.014	0.016	0.019	0.024	0.029	—	—
G3	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.011	0.013	0.015	0.018	0.023	0.028	—	—
G4	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.019	0.021	0.024	0.028	0.033	0.039	—	—
G5	0.005/100	0.006/125	0.008/160	0.010/200									
G6	0.01/100												
G7	0.012												
G8	0.010												
G9	0.010												
G10	0.004												
G11	0.002												
G12	0.004	0.005	0.006	0.008	0.010	0.013	0.015	0.017	0.020	0.025	0.030	—	—
G13	行程小于或等于 400 时，允差小于 1 个最小脉冲当量；行程大于 400 时，允差小于 2 个最小脉冲当量。												



3.2　低速走丝电火花线切割机几何精度检验

3.2.1　工作台面的平面度的检查

JB/T 5543—1991 G1 项规定此项的允差为：在 1 000 测量长度上为 0.04。检验工具为精密水平仪。

测量简图见图 7.5-26。

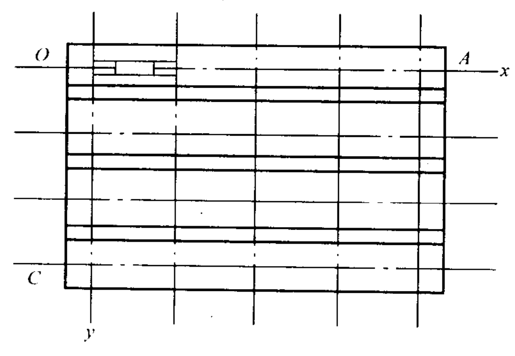


图 7.5-26　工作台面的平面度的检查简图

检验步骤如下。

对于矩形工作台面，JB/T 5543—1991 规定了通过 OAC 三点建立基准平面，根据水平仪的读数求得各测量点到基准平面的坐标值，平面度误差以被测面各点到基准平面间的最大与最小坐标值的代数差计。这种计算方法，与电火花成形机工作台面平面度误差检查中的三角点法相同，其数据的采集与运算，均按三角点法处理，无论得出的平面度误差值是否在允差范围内，均以该值作为评定依据。

实际上的低速走丝线切割机，较多采用工件安装台结构，其平面度误差的测量视工件安装台结构的不同而有所不同。工件安装台的结构见图 7.5-27。

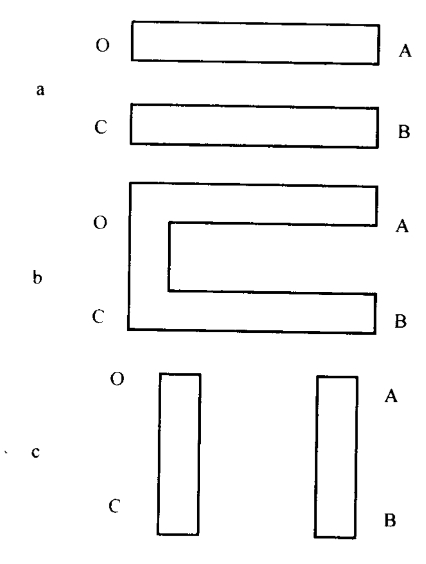


图 7.5-27　低速走丝电火花线切割机工件安装台常见结构形式

对于这三种结构形式的工件安装台，平面度的检测方法步骤有所不同。

1）对于结构 a，由于两块安装台均较窄，因而以其上两条中心线处代表平面。测量步骤如下。

① 按每边不少于 4 跨 5 点布线和调整桥板跨距 L。

② 将精密水平仪（合像水平仪或电子水平仪）置于桥板上，起始点置零，沿 OA 线和 CB 线分别测量出各点的水平仪读数值 $a(i,j)$。

OA 线：　0　$a(1,1)$　$a(1,2)$　$a(1,3)\cdots a(1,m)$

CB 线：　0　$a(2,1)$　$a(2,2)$　$a(2,3)\cdots a(2,m)$

③ 将上述读数值逐点累加，获得各测量点相对于水平仪零位平面的高度值 $b(i,j)$。

$$b(i,j) = a(i,j) + b(i,j-1)$$

OA 线：　0　$b(1,1)$　$b(1,2)$　$b(1,3)\cdots b(1,m)$

CB 线：　0　$b(2,1)$　$b(2,2)$　$b(2,3)\cdots b(2,m)$

④ 以 O、C 两测量起始点（O 位点）的连线为旋转基线，将 $b(1,m)$ 点旋转为零。获得上述各测量点相对于 OAC 三点组成的平面的高度值 $c(i,j)$。

$$c(i,j) = b(i,j) - \frac{b(1,m)}{m} \times j$$

0　$c(1,1)$　$c(1,2)$　$c(1,3)\cdots c(1,m)$

0　$c(2,1)$　$c(2,2)$　$c(2,3)\cdots c(2,m)$

⑤ 上述矩阵 $c(i,j)$ 中，各测量点的最大与最小高度差乘以桥板跨距，再乘以水平仪分度值所得的积即为该工作台面平面度误差 $\Delta_{(三角点)}$。

$$\Delta_{(三角点)} = [c(i,j)_{max} - c(i,j)_{min}] \times L \times \alpha$$

式中，L 为桥板跨距，mm；α 为精密水平仪分度值，mm/mm。

2）对于结构 b，由于工件安装台是由矩形的三条边组成的，且各边的宽度均较窄，因而也是以其上的三条中心线处代表平面。测量步骤如下。

① 按不少于 4 跨 5 点布置测量线和调整桥板跨距。为便于计算，纵横向跨距最好取等值。

② 将精密水平仪置于桥板上，按 OA、CB 和 OC 测量线，分别测量出各点的水平仪读数值 $a(i,j)$，其中 $a(0,0)$，作为测量的起始点，置 0；$a(n,0)$ 在 CB 线上作为测量起始点，置 0；在 OC 线上作为测量终点，按实测值计。

OA 线：$a(0,0)$　$a(0,1)$　$a(0,2)\cdots a(0,m)$

CB 线：$a(n,0)$　$a(n,1)$　$a(n,2)\cdots a(n,m)$

OC 线：$a(0,0)$　$a(1,0)$　$a(2,0)\cdots a(n,0)$

③ 将上述 $a(i,j)$ 按矩阵排列后，逐点累加，获得各测量点相对于水平仪 0 位所在的平面的高度值 $b(i,j)$。当 $i=0$ 且 $j=0$ 时，$b(i,j) = a(i,j) = 0$；当 $j=0$ 时，$b(i,j) = a(i,j) + b(i-1,j)$，其中 $a(n,0)$ 按 OC 线上的实测值计；当 $j>0$ 且 $i=0$ 或 n 时，$b(i,j) = a(i,j) + b(i,j-1)$；当 $j>0$ 时，且 $0<i<n$ 时，无测量点，$b(i,j)$ 置空。

$b(0,0)$　$b(0,1)$　$b(0,2)$　$b(0,3)\cdots b(0,m)$

$b(1,0)$

$b(2,0)$

$b(3,0)$

…

$b(n,0)$　$b(n,1)$　$b(n,2)$　$b(n,3)\cdots b(n,m)$

④ 将上述矩阵中的角点 $A[b(0,m)]$ 和角点 $C[b(n,0)]$ 旋转到与角点 $O[b(0,0)]$ 等值，计算出各测量点相对于角点 OAC 构成的基准平面的高度值 $c(i,j)$。

$$c(i,j) = b(i,j) - \frac{b(0,m)}{m} \times j - \frac{b(n,0)}{n} \times i$$

$c(0,0)$　$c(0,1)$　$c(0,2)$　$c(0,3)\cdots c(0,m)$

$c(1,0)$

$c(2,0)$

$c(3,0)$

…

$c(n,0)$　$c(n,1)$　$c(n,2)$　$c(n,3)\cdots c(n,m)$

⑤ 计算出该工作台面的平面度误差 $\Delta_{(三角点)}$。

$$\Delta_{(三角点)} = [c(i,j)_{max} - c(i,j)_{min}] \times L \times \alpha$$

3）对于结构 c，由于其左、右两块工件安装台的长和宽都比较大，在一条线上所布的点难以形成其代表平面。因此，测量时还得采用和矩形工作台一样的网格布线法，将其视为

一块平面，布点测量。其测量方法与数据处理与前述电火花成形机工作台面平面度误差检查的三角点法基本相同，只是由于其中间置空，在测量和数据处理时还得注意以下几点。

① 在对长边测量线布点时，应考虑使中间置空段的长度是桥板跨距的整数倍，且落在两头工件安装台上的测点均不得少于2跨3点均布。

② 中间置空段作为一跨处理，测量时，先将两等高块置于中间置空段两端的测量点上，再将精度不低于0级的平尺置于两等高块上，最后将在测量非置空段时已安装好的桥板、精密水平仪按同测量方向置于平尺上，读出水平仪读数。

③ 中间置空段测量出的水平仪读数，应转化为和非置空段等跨距时的读数记入 $a(i,j)$ 中，其计算方法为：

$$X_{转} = \frac{L_{空} \times X_{读}}{L_{桥}}$$

式中，$X_{转}$ 为转化为与非置空段等跨距时的读数；$L_{空}$ 为平尺下两等高块之间的距离；$X_{读}$ 为水平仪在平尺上的读数；$L_{桥}$ 为非置空段桥板的跨距。

④ 在对测量数据进行矩阵排列时，中间置空段应按其长度与桥板跨距的倍数，补置虚点。其矩阵序号 (i,j) 按顺序排列，以便于基面旋转时的旋转量计算。

根据机床工作台台面的长边尺寸，按标准规定的允差，计算出被检机床工作台面平面度实际允许的误差，上述按三角点法计算出平面度误差值，应落入其范围内，否则为不合格。

3.2.2 工作台移动的直线度的检查

JB/T 5543—1991 G2、G3 项规定了工作台移动在垂直面内的直线度允差：在100测量长度内为0.006；每增加200允差值增加0.005。又规定了工作台移动在水平面内的直线度允差：在100测量长度内为0.005；每增加200，允差值增加0.005。检验工具为指示器、平尺、垫块。

测量简图见图7.5-28、图7.5-29。

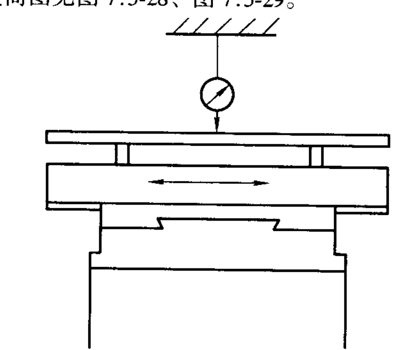


图 7.5-28 工作台移动在垂直面内的直线度的检查简图

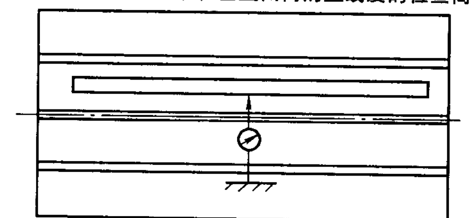


图 7.5-29 工作台移动在水平面内的直线度的检查简图

低速走丝线切割机工作台移动的直线度与电火花成形机的线性运动轴运动的直线度在误差的概念上是一致的，只是表述不一样而已。因此，其测量方法大同小异。具体检验步骤，读者可参照前述电火花成形机线性动动轴运动的直线度的检查，这里主要对不同之处作一说明。

1）上述检验工具中，指示器可选用分度值为0.001的千分表或分度值为0.002的杠杆千分表，也可选用扭簧表或电感测微仪。

2）测量时，指示器应固定在线架上。

3）应根据被测机床工作台纵、横向的行程，按标准规定的允差，计算出工作台移动在垂直面内和水平面内纵、横向各自全行程的允差。在作测量结果评判时，应以全行程的直线度误差作为误差值。

4）纵、横行程分别测量，以各自垂直面内或水平面内的全行程误差作为测量结果。

3.2.3 工作台移动对工作台面的平行度的检查

JB/T 5543—1991 G4 项规定此项的允差为：在100测量长度上为0.012，每增加200，允差值增加0.006。检验工具为指示器和平尺。

测量简图见图7.5-30。

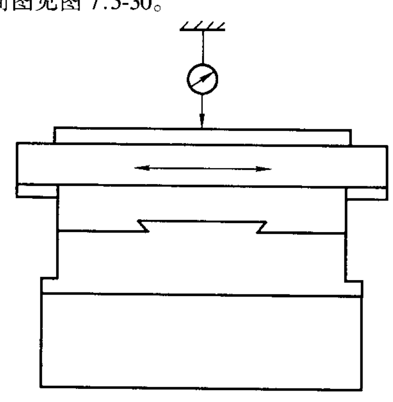


图 7.5-30 工作台移动对工作台面的平行度的检查简图

此项的检验方法与前述电火花成形机工作台面与运动轴之间的平行度的检查大体一致，这里仅对不同之处作一说明。

1）上述指示器可选用分度值为0.001的千分表或分度值为0.002的杠杆千分表。

2）指示器固定在线架上。

3）在作平行度检测时，平尺可以直接放置在工作台面上。因为此项检测时，工作台面是测量基准面，平尺工作面直接与工作台面贴合，对基准面的体现，更具代表性。

4）对于工作台结构为工件安装台的情况，当平尺无法放置在工件安装台中间时，应将平尺放在工件安装台两边作两次测量，误差以两次测量的最大值计。

5）应根据标准规定的允差，按纵、横行程分别计算出工作台纵、横向移动的全行程允差。纵、横向行程分别测量。在作测量结果评判时，应以全行程上指示器读数的最大差值作为该行程的误差值。

3.2.4 工作台横向移动对工作台纵向的垂直度的检查

JB/T 5543—1991 G5 项规定此项的允差为：0.01/200。检验工具为指示器和角尺。

测量简图见图7.5-31。

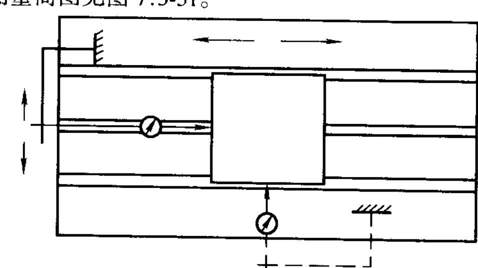


图 7.5-31 工作台横向移动对工作台纵向的垂直度的检查简图

此项的检测方法与前述电火花成形机的 X 轴运动与 Y 轴运动之间的垂直度的检查基本一致。这里仅将不同之处作一说明。



1）指示器可选用分度值为 0.001 的千分表或分度值为 0.002 的杠杆千分表。

2）指示器固定在线架上。

3）纵向行程作为测量的基准，在工作台作纵向移动时将角尺基准面校平。

4）应根据标准规定的允差，按横向行程计算出该项的全行程允差。测量结果以指示器在工作台横向移动时全行程上最大读数差计，并以此值作为该项的全行程误差值。

3.2.5　线架垂直移动对工作台面的垂直度的检查

JB/T 5543—1991 G6 项规定此项的允差为 0.01/100。检验工具为指示器和圆柱角尺。

测量简图见图 7.5-32。

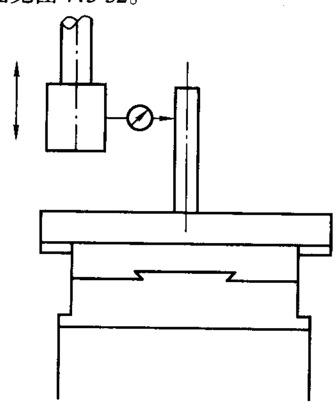


图 7.5-32　线架垂直移动对工作台面的垂直度的检查简图

检验步骤如下。

1）根据线架垂直移动的行程选择一测量长度与其相适应的 0 级以上精度的圆柱角尺（也可选用精度相应的直角尺），将其置于工作台的中间。对于结构形式为 T 形槽的矩形工作台，可将其直接置于工作台的正中位置。对于结构形式为工件安装台的工作台，可先用一平尺置于工件安装台上，再将圆柱角尺安置在平尺上，调整平尺和圆柱角尺的位置，使得圆柱角尺处于工件安装台的正中位置。如用直角尺，直角尺的基准面应处于工作台的正中位置，此时，工作台应处于纵、横向行程的中间。

2）选用一只分度值为 0.001 的千分表或分度值为 0.002 的杠杆千分表，并固定在线架上。

3）将线架移动到其行程的下端（或上端）极限位置。指示器测头垂直触及圆柱角尺平行于工作台纵向（或横向）行程的直径端点所在的母线的下端（或上端）。轻轻沿横向（或纵向）移动工作台，至指示器指针出现拐点时停止。

如用直角尺，指示器测头垂直触及直角尺工作面，轻轻在水平面内转动直角尺基准面，使得工作面作纵向（或横向）短行程（以直角尺工作面的宽度为限）移动时，指示器读数在直角尺工作面宽度方向上的两端大致相等。再移动工作台，使指示器测头触及直角尺工作面宽度方向的中间。

4）向上（或向下）全行程移动线架，按 25 mm 等距离取点、锁紧，读取指示器的示值。以全行程最大读数差作为该方向上的误差值。

5）该项测量在平行于工作台纵向行程和横向行程的圆柱角尺两个互成 90°的直径方向上进行。对于直角尺，在其基准面的长边分别平行工作台的纵向和横向行程的两个方向上进行，以所得的两个方向的误差值中的较大值作为该项的误差值。

6）应根据标准规定的允差，按线架移动的行程计算出该项的全行程允差。

3.2.6　线架移动对工作台垂直面内平行度的检查

JB/T 5543—1991 G7 项规定此项的允差为 0.012。检验工具为指示器、平尺和垫块。

测量简图见图 7.5-33。

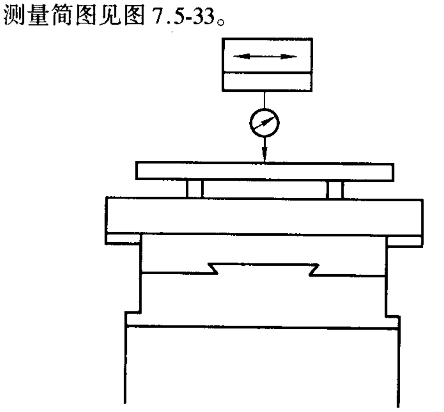


图 7.5-33　线架移动对工作台垂直面内的平行度的检查简图

检验步骤如下。

1）根据工作台纵向（或横向）行程选择一长度与其相适应的 0 级以上精度的平尺。指示器选用分度值为 0.001 的千分表或分度值为 0.002 的杠杆千分表。垫块一般选用高度尺寸可变换的量块或量块组。

2）线架置于其上下行程的中间并锁紧，工作台置于横向（或纵向）行程中间，线架横向（或纵向）亦置于行程中间。将平尺沿着工作台纵向（或横向）置于工作台中间（如工作台结构为工件安装台形式，平尺无法置于其中间，可以将平尺放置在其一侧的安装板上），平尺的下部两端的白塞尔点处用垫块支承。

3）指示器固定在线架上，指示器测头垂直触及平尺的上工作面，调整平尺位置，使得工作台纵向（或横向）全行程移动时，指示器测头均能触及平尺的工作面。

4）调整垫块高度，使得工作台纵向（或横向）全行程移动时，指示器在平尺两端的读数相等。再将工作台移动到纵向（或横向）行程中间。

5）纵向（或横向）全行程移动线架，读取指示器的示值，其最大与最小读数差即为该方向的误差值。

6）此项检查，在线架与工作台的纵、横运动两个方向进行。

3.2.7　线架移动对工作台水平面内的平行度的检查

JB/T 5543—1991G8 项规定此项的允差为 0.01。检验工具为指示器、平尺和垫块。

测量简图见图 7.5-34。

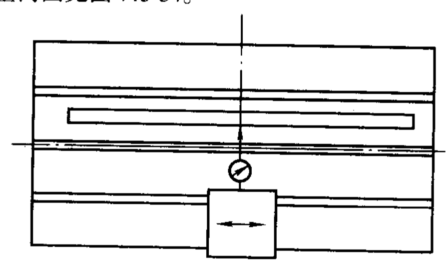


图 7.5-34　线架移动对工作台水平面内的平行度的检查简图

此项检查与上述线架移动对工作台垂直面内的平行度的检验步骤基本一致。所不同的是此项检查在水平面内进行。

1）在放置平尺时，使平尺的非工作面置于工作台上，工作面与工作台面垂直。

2）可以在平尺下面的支承点处垫两只等高块，也可以将平尺直接置于工作台上，因为此时平尺的挠度对其工作面的直线度没有影响。

3）指示器测头应沿水平方向垂直触及平尺工作面。

4）校准平尺时，只需沿水平方向轻轻转动平尺，就可

将指示器在工作台行程两端的读数校得相等。

3.2.8　线架横向移动对线架纵向的垂直度的检查

JB/T 5543—1991 G9 项规定此项的允差为 0.01。检验工具为指示器和角尺。

测量简图 7.5-35。

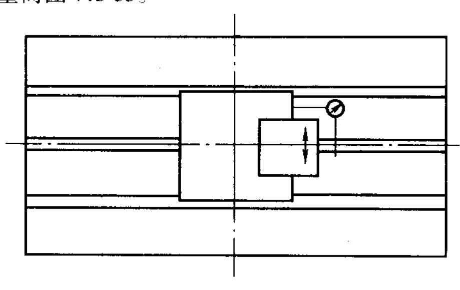


图 7.5-35　线架横向移动对线架纵向的垂直度的检查简图

检验步骤如下。

1）根据线架纵、横向的行程，选择一测量范围与其相适应的 0 级以上精度的直角尺。指示器选用分度值为 0.001 的千分表或分度值为 0.002 的杠杆千分表。

2）工作台处于纵、横向行程的中间，线架处于其上下行程的中间并锁紧。线架横向位置置于其行程的中间。

3）直角尺水平放置在工作台的中间（也可借助辅助桥板，放置在工件安装台的中间），使直角尺的基准面大致与线架纵向移动平行。

4）指示器固定在线架上，指示器的测头沿水平方向垂直触及直角尺的基准面，沿纵向全行程移动线架，观察指示器示值，沿水平方向轻轻转动直角尺，直到指示器在其行程两端的读数相等。

5）将线架沿纵向移动到其行程中间。重新安装指示器，使其测头沿水平方向垂直触及直角尺的测量面，沿横向全行程移动线架，读取指示器示值，其最大与最小读数之差即为该项的误差值。

3.3　低速走丝电火花线切割机数控精度检验

3.3.1　工作台运动的失动量的检查

JB/T 5543—1991 G10 项规定此项的允差为 0.004。检验工具为指示器和基准块，测量简图见图 7.5-36。

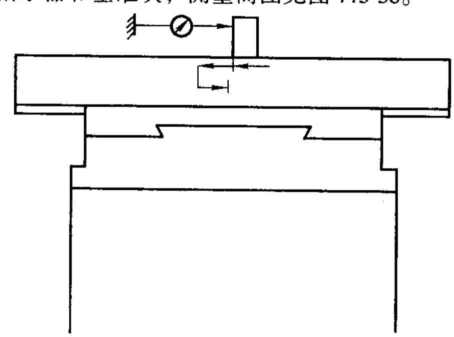


图 7.5-36　工作台运动的失动量的检查简图

检验步骤如下。

1）指示器选用分度值为 0.001 的千分表或分度值为 0.002 的杠杆千分表。基准块应便于固定，且其安装面与测量面应相互垂直，测量面的表面粗糙度 $R_a \leqslant 0.8\ \mu m$。

2）将线架置于其上下行程的中间并锁紧，线架纵、横向也置于其行程的中间。指示器固定在线架上，也可固定在与工作台有相对位移的其他部件上。

3）工作台非测量轴置于行程的中间，测量轴移动到一端离行程极限约 5～20 mm 处（视行程长短而定）。

4）将基准块安装在测量轴的适当位置处，指示器测头沿测量轴方向垂直触及其测量面，沿非测量轴方向移动工作台，在水平面内转动基准块，观察指示器示值，将基准块的测量面调整到与测量轴方向相垂直。

5）工作台沿测量轴行程，向正（或负）方向移动一定的距离（使压表 0.02～0.05 mm），以停止位置作为基准位置，读取指示器示值（或使指示器置零）。然后数控系统给予不少于 0.1 mm 的指令，令工作台继续向同一方向移动。停止后，从这个位置开始，再给予相反的指令，令工作台向负（或正）的方向移动，读取停止时指示器的示值。计算出此时停止位置与基准位置的读数差。在该位置重复上述测量七次，取七次读数差的平均值作为该位置失动量的误差值。

6）将工作台该测量轴移到其行程的中间和另一端距行程极限 5～20 mm 处，分别重复上述测量。以三个位置的误差值中的最大值作为工作台该测量轴的失动量的误差值。

7）此项检查对工作台纵、横向运动分别进行，次序不分先后。

由于激光测量仪已经越来越普遍地用于机床检测，本项目也可采用激光测量仪进行检查。此时无需指示器与基准块，从仪器的显示器上读数，或由仪器打印打出检查结果。

3.3.2　工作台运动的重复定位精度的检查

JB/T 5543—1991 G11 项规定此项的允差为 0.002。检验工具为指示器和基准块。

测量简图见图 7.5-37。

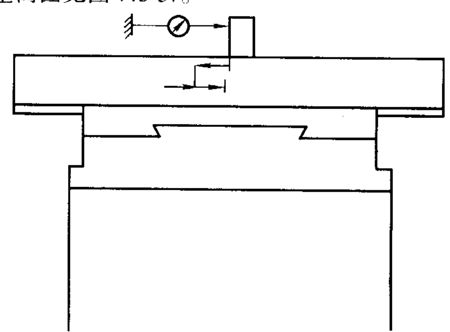


图 7.5-37　工作台运动的重复定位精度的检查简图

检验步骤如下。

1）本项测量在检验工具的选择、安装以及机床运动部件所处的位置与上述工作台运动的失动量的检查完全相同。因此，测量时，可先按上述 3.3.1 节步骤 1）～步骤 4）进行操作，然后再按下面的步骤进行。

2）工作台先沿测量轴行程向正（或负）方向移动一定的距离（使压表 0.02～0.05 mm），以停止位置作为起始点，然后令数控系统给予不少于 0.1 mm 的指令，使工作台继续向正（或负）方向移动，读取停止位置指示器的示值。再给予相反的指令，使工作台再向负（或正）方向移动，读取停止位置指示器的示值。如此令工作台进行七次重复定位，计算七次指示器读数中最大值与最小值之差，并以此作为该位置运动的重复定位精度的误差值。

3）将工作台该测量轴移动到行程的中间和另一端距行程极限 5～20 mm 处，分别重复上述测量，以三个位置的误差值中的最大值作为工作台该测量轴运动的重复定位精度的误差值。

4）本项检验对工作台纵、横向运动分别进行，次序不分先后。

本项目同样可以采用激光测量仪进行检查，此处不再赘述。

工作台运动的失动量和工作台运动的重复定位精度可合并起来检验。在测量工作台某运动轴某一位置的失动量和重复定位精度时，选用一测量范围大于 0.3 mm 的千分表，将



其在基准块上压表至其测量范围的中间。然后令数控系统给予一不少于 0.1 mm（但要少于千分表测量行程的一半）的移动指令，使工作台沿该测量轴按正方向、负方向，负方向、正方向的顺序按相同的指令移动一个循环。当工作台沿该测量轴作正方向、负方向移动时，读取负方向停止时的读数。当工作台作负方向、正方向移动时，读取正方向停止时的读数。如此作七个循环的重复测量，分别读取负方向停止时和正方向停止时各自的七个读数。以两个方向停止时各自七个读数的平均值之差作为该位置上该测量轴运动的失动量误差；以两个方向停止时各自七个读数的最大差值中的较大值作为该位置工作台运动的重复定位精度误差值。

3.3.3　工作台运动的定位精度的检查

JB/T 5543—1991G12 项规定此项的允差为：在 300 测量长度上为 0.012，每增加 200，允差值增加 0.005，最大允差值为 0.03。检验工具为精密线纹尺，读数显微镜和等高块。

测量简图见图 7.5-38。

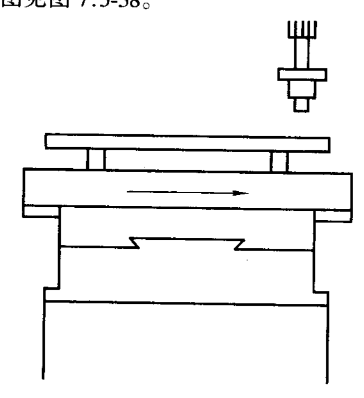


图 7.5-38　工作台运动的定位精度的检查简图

检验步骤如下。

1）根据机床工作台纵横向运动的行程，选择一根测量长度与其相适应的二等标准以上的金属线纹尺和一架放大倍数与该线纹尺相匹配的、最小分度值为 0.001、测量范围为 1 mm 的读数显微镜。线纹尺应在测量现场与机床预先等温。

2）线架纵、横行程和上下行程均置于中间位置。测量工作台纵向行程时，工作台横向置于行程中间。同样，测量工作台横向行程时，其纵向置于行程中间。

3）将线纹尺沿测量轴运动方向置于工作台中间，其底面两端的白塞尔点处用等高块支承。若工作台采用工件安装台结构，可借助于辅助桥板将线纹尺安装在工件安装台中间。

4）在线架上固定一千分表，千分表测头沿水平方向垂直触及线纹尺的侧基准面，快速沿测量轴运动方向移动工作台，观察千分表示值，调整线纹尺，使得千分表读数在其行程两端时相等。

5）从线架上取下千分表，用一适当夹具将读数显微镜安装在线架上，使得读数显微镜在工作台纵向（或横向）全行程移动时能够瞄准线纹尺刻线。

6）上下调整读数显微镜物镜与线纹尺刻线面间的距离，调整目镜视度，使得线纹尺上的毫米刻线清晰地显现在读数显微镜目镜视场中。

7）工作台测量轴移动到其测量行程的一端，从该端点起，工作台向正（或负）方向移动适量的距离，消除反向间隙后，以停止位置作为基准。有机械零位的机床，数控系统应令工作台返回该测量轴的机械零位，以该机械零位作为测量的基准。读数显微镜百分位、千分位置零后，用十分位的双刻线套线纹尺毫米刻线。在套双刻线时，尽量不使用两头的 0.0 双刻线和 1.0 双刻线，以避免放大倍数误差给测量带来的影响。

8）数控系统按表 7.5-10 所列的间隔 L 给指令，使工作台按同一方向在全行程上等距离顺序移动，进行定位。根据基准位置，在显微镜上逐点测量出实际移动距离相对于规定移动距离的偏差。测定值中的最大偏差与最小偏差之差为该测量轴上该运动方向上的定位精度的误差值。

表 7.5-10　工作台运动的定位精度测量间隔　mm

工作台行程	测量间隔 L	测量长度
< 125	10	全行程
> 125 ~ 320	20	
> 320	50	

9）给该测量轴一小段运动指令，使该轴沿上述运动方向继续向前移动，停止后再给以相同数量的运动指令，使该轴反向移动，消除间隙。然后以该停止位置作为基准，读数显微镜重新置零。按上述测量间隔在全行程上进行反方向等距离顺序移动定位。根据基准位置逐点测量出实际移动距离与规定移动距离的偏差，测量值中的最大偏差与最小偏差之差为该测量轴在该运动的反方向上定位精度的误差值。

10）根据被检机床工作台行程，计算出该测量轴的全行程允差，以上述正、反向误差值中的较大值作为该测量轴的误差值，将此值和全行程允差进行比较，来判定工作台该测量轴的定位精度是否合格。

11）此项检查在工作台的纵、横向运动轴上分别进行，次序不分先后。

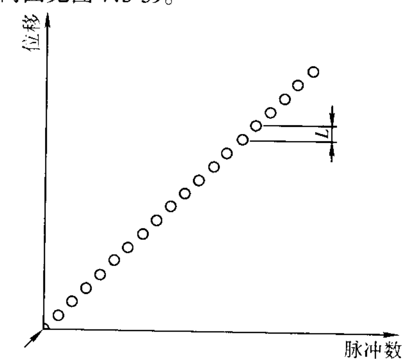
显然，定位精度也可以用激光测量仪来检测。采用激光测量仪检测，具有快速、精确的优点。

失动量、重复定位精度、定位精度均可在数控系统作了反向间隙补偿、螺距误差补偿后再检查。

3.3.4　每一脉冲指令的进给精度的检查

JB/T 5543—1991 G13 项规定此项的允差为：小于 1 个最小脉冲当量。检验工具一般采用指示器、基准块，也可采用电感测微仪。

测量简图见图 7.5-39。



误差 $=(L-m)_{max}$

式中，L 为相邻停止位置的距离；m 为最小脉冲当量

图 7.5-39　单脉冲进给精度的检查简图

检验步骤如下。

1）本项检查中指示器的选择、安装以及机床各运动部件所处的位置与上述工作台运动的失动量的检验步骤完全相同，因此测量时可先按 3.3.1 节中 1）~4）进行操作，再按下面的步骤进行。也可将指示器固定在工作台上，以线架的某一垂直于测量行程的表面作为测量面，将指示器的测头垂直触及其上。

2）工作台先沿测量轴运动方向，向正（或负）方向移动一定的距离（使压表 0.02 ~ 0.05 mm），以停止位置作为基准，指示器置零。然后每次给一个最小脉冲指令，使该测量轴向同一方向移动，共移动 20 个脉冲指令的距离。在指示

器上依次读出各个指令停止时工作台相对基准位置的移动距离 a_i，获一系列读数：

a_0　a_1　a_2　a_3　$\cdots a_{20}$

3）计算相邻读数差 b_i，$b_i = a_i - a_{i-1}$（$i = 1, 2, 3, \cdots, 20$），获得每次脉冲指令的实际移动距离：

b_1　b_2　b_3　$\cdots b_{20}$

4）计算每次脉冲指令的实际移动距离与规定移动距离的偏差 C_i，$C_i = b_i$ - 最小脉冲当量。

C_1　C_2　C_3　$\cdots C_{20}$

5）C_i 中，绝对值最大者为该测量轴在该位置的每一脉冲指令进给精度的误差值。

6）将工作台移动到该测量轴行程的中间和另一端距端点 5～20 mm 处，分别重复上述测量。以三个位置误差值中的最大值作为该测量轴的误差值。

7）此项检验在工作台纵横向运动轴上分别进行，次序不分先后。

3.4　低速走丝电火花线切割机工作精度检验

3.4.1　正八方试件的尺寸精度检查

JB/T 5543—1991 P1、P2 项对正八方试件的尺寸精度规定了两个检验项目：P1 项，纵剖面上的尺寸差，允差为 0.012；P2 项，横剖面上的尺寸差，允差为 0.015。检验工具均为千分尺。见图 7.5-40。

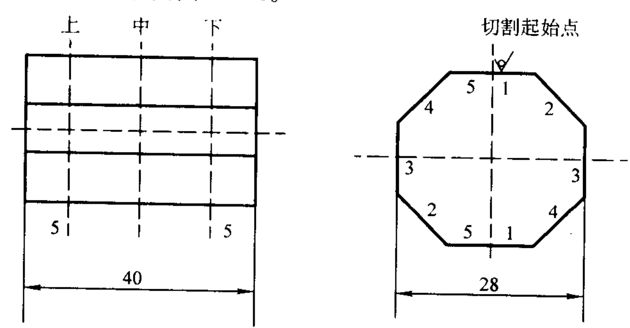


图 7.5-40　正八方试件

检验步骤如下。

1）在被检机床上，按上图尺寸，编程切割出试件 P1，并清洗干净。

2）选用一把 25～50 mm 的杠杆千分尺或微米读数千分尺，与 P1 试件放置在一起等温 2 h 以上。

3）用千分尺分别测量出图示 1－1，2－2，3－3，4－4，5－5 两个平行加工表面间的上、中、下三个位置上的尺寸，并记录在表 7.5-11 中。

表 7.5-11　正八方试件测量记录表

位置	1－1	2－2	3－3	4－4	5－5	横剖面上的尺寸差
上						
中						
下						
纵剖面上的尺寸差						

4）计算出每个测量对边的上、中、下三个位置的最大尺寸与最小尺寸之差，作为该测量对边的纵剖面上的尺寸差，并记录在上表中。

5）计算出在上、中、下三个位置的五个测量对边的最大尺寸与最小尺寸之差，作为五个测量对边中该位置的横剖面上的尺寸差，并记录在上表中。

6）上表中，五个纵剖面上的尺寸差中的最大值为该试件的纵剖面上的尺寸差误差值；三个横剖面上的尺寸差中的最大值为该试件的横剖面上的尺寸差误差值。

3.4.2　四方试件的表面精糙度的检查

JB/T 5543—1991P3、P5 项对加工表面粗糙度规定了两个检验项目：P3 项，在一定的加工要求下，试件的表面粗糙度应达到 $R_a \leqslant 2.5\ \mu m$；P5 项，不计加工条件，试件的表面粗糙度应达到 $R_a \leqslant 1.25\ \mu m$。检验工具为电动轮廓仪。

试件简图见图 7.5-41。

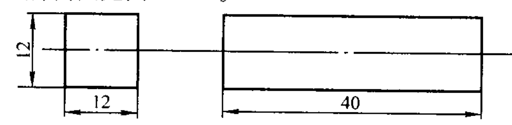


图 7.5-41　四方试件

检验步骤如下。

1）在被检机床上，按材料去除率大于 25 mm²/min，切割走向为 45°斜线，边长为 12 mm × 12 mm 的正方形轨迹，编程切割出如上图所示的试件 P3。此试件也可用前述正八方试件 P1 代替，以按 45°斜线走向切割出的 4 个面代替 P3 试件的 4 个面。

2）在被检机床上用精加工规准，尽量发挥机床切割在表面粗糙度方面的最大潜能，按边长为 12 mm × 12 mm 的正方形轨迹，编程切割出尺寸如上图所示的试件 P5。

3）在电动轮廓仪上，以垂直于走丝方向的测量轨迹，在试件加工面的中间及距两端 5 mm 处分别测量出其轮廓十点算术平均高度 R'_a 值，以三处的平均值 R_a 作为该加工面的表面粗糙度。对试件的 4 个加工面分别测量，以各 R_a 中的最大值作为试件表面粗糙度。

4）对 P3（或 P1）试件的测量结果，即为在规定条件下的试件的加工表面粗糙度；对 P5 试件的测量结果，即为不计加工条件时，试件所达到的最低表面粗糙度。

3.4.3　锥八方式件的大端尺寸差检查。

JB/T 5543—1991 P4 项规定对锥八方试件作大端尺寸差检查，允差为 0.05。检验工具为万能工具显微镜。

试件简图见图 7.5-42。

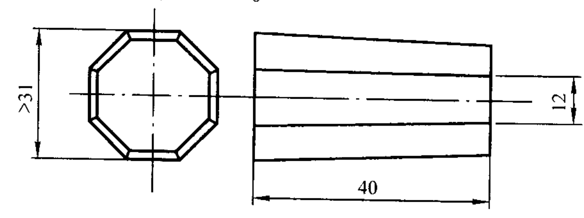


图 7.5-42　锥八方试件

检验步骤如下。

1）在被检测机床上按上图所示形状与尺寸，编程切割出锥八方试件。要求无论作正锥切割，还是作倒锥切割，编程面必须是锥八方的小端。以此来考核机床的锥度机构，由于联动运动而在锥八方体的大端造成的误差大小。

2）将试件清洗干净后，置于万能工具显微镜的玻璃工作台中央等温 2 h 以上。

3）将试件锥度小端面置于万能工具显微镜的工作台上，锥度大端面朝上，并使其八边形的一条边与工作台纵向移动大致平行。

4）调整显微镜物镜与锥度试件大端面的距离，调整显微镜目镜视度，沿纵、横向移动工作台，使试件大端面与工作台纵向平行的一条边的影像清晰地落入目镜视场中。

5）纵向移动工作台，观察目镜视场中测量边的影像位置的变化，调整玻璃工作台左右两个微调螺钉，使得目镜中的米字线中央横线在测量边两端的压线一致。

6）纵向移动工作台，使米字线中央竖线大致落入测量边的中间，纵向锁紧，横向微动工作台，米字线中央横线压

影像线。横向读数显微镜套线读数。再横向移动工作台，使得试件另一对边的影像落入目镜视物，压线、读数。上述两次读数差即为试件该测量对边的尺寸 L_1。

7）将工作台横向移动到上述两次位置的中央，即两次读数相加再除以 2 的数字位置，横向锁紧。在显微镜的纵向坐标上用上述同样的方法测量出与上述测量边相互垂直的两对边间的尺寸 L_3。

8）将试件在工作台上旋转 45°，重复上述 5）～7）操作，测量试件另外两组相互垂直的对边间的尺寸 L_2 和 L_4。

9）如试件的切割起点为某一测量边的中间，测量时要注意：(a) 应避免以该边校平；(b) 应对切割点两边的轮廓分别压线、读数，分别计算出其与对边间的尺寸 L_1 和 L_2。

10）上述四组（或五组）对边间的尺寸中的最大值与最小值之差即为该锥度大端尺寸差误差。

3.4.4　四孔试件的加工精度的检查

JB/T 5543—1991P6、P7 项对四孔试件的加工精度规定了两个检验项目：P6 项，加工孔的坐标精度，允差为 0.012；P7 项，加工孔的一致性，允差为 0.020。检验工具为万能工具显微镜。

试件简图见图 7.5-43。

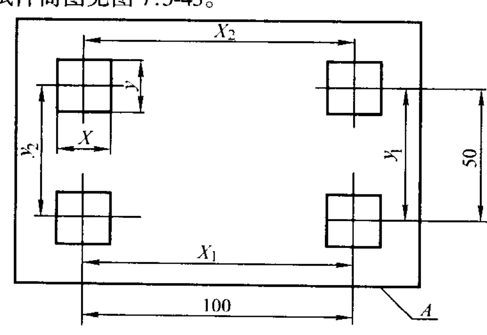


图 7.5-43　四孔试件

低速走丝线切割机四孔试件的制备、测量及数据处理与前述电火花成形机四孔试件的要求基本相同，具体测量步骤可参阅 2.4 节。不同之处在于电火花成形机的四孔试件的四孔是用圆铜电极加工出来的圆孔，而低速走丝线切割机的四孔试件的四孔是用电极丝切割出来的方孔。因而在测量时要注意方孔与圆孔的不同，测量方孔的四边坐标尺寸时要以四边的中间压线、对表，与圆孔以圆弧顶点压线、对表不同。此外，低速走丝线切割机床四孔试件中，四孔的中心距在 X 方向为 100，在 Y 方向为 50。且对角线尺寸不作要求，这与成形机四孔试件也有所不同。

4　高速走丝电火花线切割机的精度检验

本节介绍快走丝电火花线切割机产品精度检验的基本方法与检验要点。

4.1　检验要求说明

1）适用标准与项目

适用标准：GB/T 7926—1987《电火花线切割机 精度》

适用项目：G1～G10，P1～P5。

2）检验某一项目时，不参与或不发生运动的线性运动轴应位于该轴行程的中间位置。运动轴的驱动应该是快速，或正常工况时的进给速度。

3）当实际测量长度与该标准所规定的长度不同时，允差值可根据 GB/T 17421.1—1998 标准中“2.3.1.1 计量单位和测量范围”的要求进行折算，折算后允差值修约至三位小数（以 mm 为单位）。折算结果小于 0.001 mm 时，仍按 0.001 mm计。

对于主参数（工作台行程）符合 GB/T 7925—1987《电火花线切割机　参数》标准所规定的系列尺寸的高速走丝电火花线切割机的各项几何精度检验项目（G1～G10）的允差折算可见表 7.5-12。

表 7.5-12　GB/T 7926—1987 标准几何精度检验项目允差折算一览表

mm

序号＼允许＼行程	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600
G1				0.008	0.010	0.013	0.016	0.020	0.025	0.032	0.040	0.050	0.064
G2	0.006	0.006	0.007	0.008	0.008	0.009	0.010	0.012	0.014	0.016	0.020	—	—
G3	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.008	0.009	0.011	0.014	0.016	—	—
G4	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.019	0.021	0.024	0.028	0.033	0.039	—	—
G5	0.006/100	0.008/125	0.010/160	0.012/200									
G6	储丝筒直径小于或等于 120 为 0.012，大于 120 为 0.02												
G7	0.005												
G8	0.002												
G9	0.010	0.011	0.012	0.012	0.014	0.016	0.018	0.020	0.023	0.028	0.030	—	—
G10	行程小于或等于 400 时，允差小于 1 个最小脉冲当量；行程大于 400 时，允差小于 2 个最小脉冲当量												

4.2　高速走丝电火花线切割机几何精度检验

按 GB/T 7926—1987 标准的规定，高速走丝电火花线切割机的几何精度共有 6 项。其中前 5 项 G1－G5 与 JB/T 5543—1991 标准（低速走丝电火花线切割机精度标准）的前 5 项 G1－G5 在项目设置上完全相同，但在允差、检验工具和检验方法上略有区别。第 6 项为高速走丝机床所特有的项目。对于线架精度，GB/T 7926—1987 标准尚未列入检验范围。

4.2.1　工作台台面的平面度的检查

GB/T 7926—1987G1 项规定此项的允差为：在 1 000 测量长度上为 0.04。检验工具为平尺、等高块和量块或精密水平仪。

测量简图见图 7.5-44。

图 7.5-44　工作台台面的平面度的检查简图

检验步骤如下。

高速走丝电火花线切割机的工作台一般为带 T 形槽的矩形工作台。其上放置的工件安装桥板，不是工作台。用精密水平仪进行测量是常用的测量方法，具体检验步骤与电火花成形机以及低速走丝线切割机的矩形工作台的平面度的检测完全相同，这里不再复述，可参阅前面有关章节。下面介绍标准允许的另一种检测方法——平尺、等高块、量块法。

1）根据矩形工作台的两对角尺寸选择一长度与其相适应的 0 级以上精度的平尺，两等高块和一组带微米量块的 46 块组或 87 块组 3 级精度以上的量块。

2）按图 7.5-45 布置测量线。

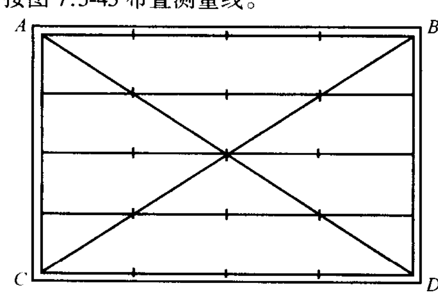


图 7.5-45　工作台测量线的布置

对于长度大于等于 400 的矩形边，按不少于 4 跨 5 点布置；对于长度大于等于 250、小于 400 的矩形边，按不少于 3 跨 4 点布置；对于长度小于 250 的矩形边，按不少于 2 跨 3 点布置。

3）将等高块置于 A、B 两点，平尺工作面置于等高块上，用组合量块分别测量出 AB 线上各测量点至平尺下工作面间的的距离 $a_{(0,j)}$，得到：

$a_{(0,0)}$　$a_{(0,1)}$　$a_{(0,2)}$　$\cdots a_{(0,m)}$

其中 $a_{(0,0)}$、$a_{(0,m)}$ 为等高块高度，预先用和量块比较的方法测出。

以 A、B 两点为零点，计算出各测量点相对于 A、B 两点连线的高度值 $b_{(0,j)}$：

$b_{(0,j)} = a_{(0,j)} - a_{(0,0)}$，其中 $b_{(0,0)}$、$b_{(0,m)}$ 均为 0，得到：

$b_{(0,0)}$　$b_{(0,1)}$　$b_{(0,2)}$　$\cdots b_{(0,m)}$

4）将等高块置于 A、C 两点上，用上述同样方法测量和计算出 AC 线上各点至平尺下工作面间的距离 $a_{(i,0)}$ [$a_{(0,0)}$　$a_{(1,0)}$　$a_{(2,0)}$　$\cdots a_{(n,0)}$]，及以 A、C 两点为零点，各测量点相对于 AC 连线的高度值 $b_{(i,0)}$ [$b_{(0,0)}$　$b_{(1,0)}$　$b_{(2,0)}$　$\cdots b_{(n,0)}$]，其中 b（0，0）、b（n，0）均为 0。

5）将等高块置于 B、C 点上，用组合量块测量出 BC 连线中点（测量点）至平尺下工作面的距离。并用上述同样方法计算出其相对于 B、C 两点连线的高度值 $b_{(中,中)}$。

6）上述 BC 中点上的量块组不动，将一等高块置于 A 点，平尺置于 A 点的等高块与 BC 中点上的量块组上。用组合量块测量出 D 点至平尺下工作面间的距离 $a_{(n,m)}$。再按公式 $b_{(n,m)} = a_{(n,m)} - a_{(0,0)}$ 计算出 D 点相对于 ABC 三角点组成的基准平面的高度 $b_{(n,m)}$。

7）上述测量 D 点的量块组不动，将一等高块置于 C 点，平尺置于 C 点的等高块与 D 点的量块上。用组合量块测量出 CD 线上各测量点与平尺下工作面间的距离 $a_{(n,0)}$　$a_{(n,1)}$　$a_{(n,2)}\cdots$　$a_{(n,m)}$，再按公式 $b_{(n,j)} = a_{(n,j)} - a_{(n,0)}$ 计算出 CD 线上各测量点相对于 ABC 三角点组成的基准平面的高度值 $b_{(0,0)}$　$b_{(n,1)}$　$b_{(n,2)}\cdots b_{(n,m)}$。

8）D 点量块组不动，将一等高块置于 B 点，用上述同样方法测量并计算出 BD 线上各测量点至平尺下工作面间的距离 $a_{(0,m)}$　$a_{(1,m)}$　$a_{(2,m)}\cdots a_{(n,m)}$ 和 BD 线上各测量点相对于 ABC 三角点组成的基准平面的高度值 $b_{(0,m)}$　$b_{(1,m)}$　$b_{(2,m)}\cdots\cdots b_{(n,m)}$。

9）将两等高块分别置于矩阵（1，0）点和（1，m）点上，用量块组分别测量出该测量线上各测量点至平尺下工作面间的距离 $a_{(1,0)}$　$a_{(1,1)}$　$a_{(1,2)}$　$\cdots$　$a_{(1,m)}$。其中 $a_{(1,0)}$、$a_{(1,m)}$ 是等高块的高度。再按公式 $z_{(1,j)} = a_{(1,j)} - a_{(1,0)}$ 计算出该测量线上各测量点相对于其首尾两端点连线的高度值 $z_{(1,0)}$　$Z_{(1,1)}$　$Z_{(1,2)}\cdots Z_{(1,m)}$。再将 $z_{(1,0)}$ 和 $Z_{(1,m)}$ 分别旋转到与 $b_{(1,0)}$ 和 $b_{(1,m)}$ 等值，按公式 $b_{(1,j)} = z_{(1,j)} + b_{(1,0)} + [b_{(1,m)} - b_{(1,0)}] \times j/m$ 计算出该测量线上各测量点相对于 ABC 三角点组成的基准平面的高度值 $b_{(1,0)}$　$b_{(1,1)}$　$b_{(1,2)}\cdots b_{(1,m)}$。

10）用上述同样方法分别测量并计算出测量布线图上其他未测点相对于 ABC 三角点组成的基准平面的高度值。整理后得到被测平面上各测量点相对于 ABC 三角点组成的基准平面的高度值矩阵 $b_{(i,j)}$。

$$
\begin{matrix}
b_{(0,0)} & b_{(0,1)} & b_{(0,2)} & \cdots & b_{(0,m)} \\
b_{(1,0)} & b_{(1,1)} & b_{(1,2)} & \cdots & b_{(1,m)} \\
b_{(2,0)} & b_{(2,1)} & b_{(2,2)} & \cdots & b_{(2,m)} \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
b_{(n,0)} & b_{(n,1)} & b_{(n,2)} & \cdots & b_{(n,m)}
\end{matrix}
$$

11）上述矩阵 $b_{(i,j)}$ 中的最大与最小值之差，即为该工作台面以三角点 ABC 组成的平面为基准的平面度误差的近似值。

$$\Delta_{三角点} = b_{(i,j)}\max - b_{(i,j)}\min$$

$\Delta_{三角点}$ 的值小于等于按标准规定的允差计算出的该机床工作台面的平面度允差时，该值可以作为该工作台面的平面度误差值。若 $\Delta_{三角点}$ 的值大于按标准规定的允差计算出的该工作台面的平面度允差时，按 GB/T 11337—1989 中 7.1.3 的仲裁规定，应根据矩阵 $b_{(i,j)}$ 中的数据特征，重新选定基准点，进行基面转换，得出符合最小包容区域的平面度误差，并以此作为该工作台面平面度误差是否合格的判定依据。

4.2.2　工作台移动在垂直面内的直线度的检查

GB/T 7926—1987 G2 项规定此项的允差为：在 100 测量长度上为 0.006；每增加 200，允差值增加 0.003。检验工具为指示器和平尺。

测量简图见图 7.5-46。

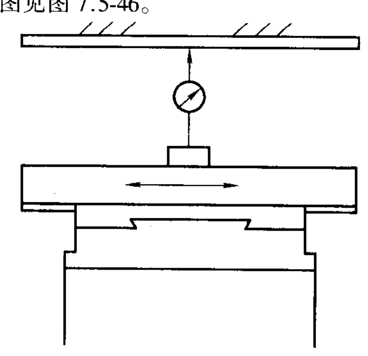


图 7.5-46　工作台移动在垂直面内的直线度的检查简图



检验步骤如下。

高速走丝线切割机工作台移动的直线度的检测，目前常用的一种方法与前面所述的电火花成形机的线性运动轴的运动直线度的检查以及低速走丝线切割机的工作台移动的直线度的检查方法一样，是将平尺置于工作台上，指示器固定在线架上进行测量。此种方法，GB/T 7926—1987 标准未规定，但可在 GB/T 17421.1—1998 5.2.3 中找到依据。具体检测方法，读者可参阅前面有关章节。

另一种方法是 GB/T 7926—1987 标准规定的方法，是将平尺置于线臂上，指示器固定在工作台面的中间进行测量。这里对此种方法作一介绍（4.2.3 节的工作台移动在水平面内的直线度的检查与此相同）。

1）根据被检机床纵、横向的行程，选择一长度与其相适应的 0 级以上精度的平尺。指示器选用分度值为 0.001 的千分表，也可以选用分度值为 0.002 的杠杆千分表。检测前还应根据被检机床的下线臂的尺寸制作一夹具，使其能将平尺稳固地放置在下线臂上。夹具见图 7.5-47。

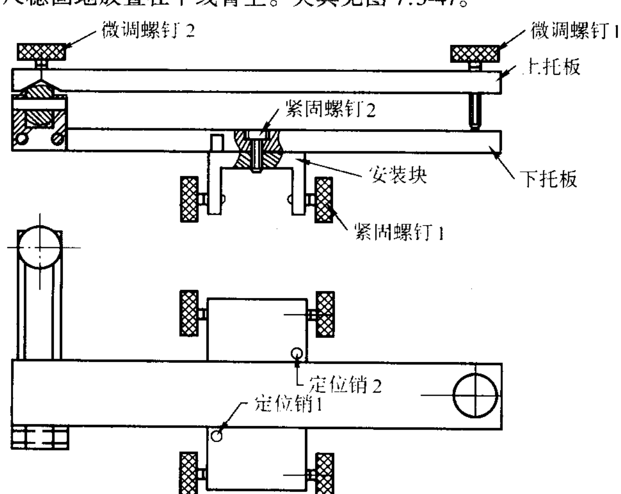


图 7.5-47 直线度检验用线臂夹具简图

2）将夹具安装块的槽骑跨在下线臂的适当位置，拧紧四个紧固螺钉 1，使夹具体稳固地安装在下线臂上。

3）松开紧固螺钉 2，转动下托板，使其侧面与定位销钉 1 接触，从而使夹具体上托板长向与工作台纵向行程基本平行（检验工作台横向行程时，转动下托板，使其侧面与定位销钉 2 接触即可），固紧紧固螺钉 2。将工作台横向置于其行程的中间位置（测量横向行程时，工作台纵向置于其行程的中间位置）。

4）将平尺置于夹具的上托板上，其下工作面两端的白塞尔点处用垫块支撑。指示器固定在工作台中间，指示器测头垂直触及平尺的上工作面。若此时工作台纵向移动时，下线臂与吸铁表座发生干涉，可使工作台在横向行程上前置，只要吸铁表座不与下线臂相碰即可。沿测量行程移动工作台，水平方向转动平尺，使平尺的侧面在长向上大体与工作台测量行程方向平行。沿非测量行程移动工作台，观察指示器示值，调整微调螺钉 2，使平尺在宽度方向上与工作台移动平行，指示器在平尺宽度方向的两端的读数差不超过 0.005 mm。沿测量方向移动工作台，观察指示器示值，调整微调螺钉 1，使工作台移动到测量行程的两端时，指示器的读数相等（不超过 0.002 mm）。再沿测量行程全行程移动工作台，读取指示器读数。其最大与最小读数之差，即为工作台的该测量行程在垂直面内的直线度误差。

5）该项测量在工作台纵、横向行程分别进行。

4.2.3 工作台移动在水平面内的直线度的检查

GB/T 7926—1987 G3 项规定此项的允差为：在 100 测量长度上为 0.003；每增加 200，允差值增加 0.003。检验工具为指示器和平尺。

测量简图见图 7.5-48。

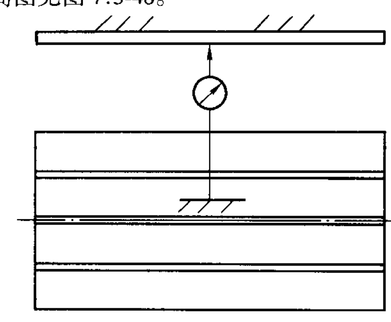


图 7.5-48 工作台移动在水平面内的直线度的检查简图

检验步骤如下。

本项目检测的常用方法，与 4.2.2 节的类似，是将平尺置于工作台上，指示器固定在线架上进行测量。同样，GB/T 7926—1987 标准规定了另一种检测方法，是将平尺置于线臂上，指示器固定在工作台面上进行测量，其检验步骤如下。

1）按 4.2.2 节中工作台移动在垂直面内的直线度的检查的 1）、2）、3）项步骤进行操作，参见图 7.5-47。

2）将平尺的工作面沿长向置于夹具的上托板上，指示器固定在工作台的中间，先将指示器测头垂直触及平尺的上侧面（非工作面），纵横向移动工作台，调整夹具的微调螺钉 1 和微调螺钉 2，使平尺的上侧面大致与工作台纵横向运动平行，此时，平尺的工作面大体与工作台面垂直。再将指示器测头垂直触及平尺的工作面上，沿测量行程移动工作台，观察指示器示值，在水平方向上轻轻转动平尺，使得指示器读数在测量行程两端时相等。再全行程沿测量行程移动工作台，读取指示器读数，其最大与最小读数之差即为该工作台在该测量行程上的直线度误差。

3）该项测量在工作台纵、横向行程分别进行。

4.2.4 工作台移动对工作台面的平行度的检查

GB/T 7926—1987G4 项规定此项的允差为：在 100 测量长度上为 0.012；每增加 200，允差值增加 0.006。检验工具为指示器、平尺和等高块。

测量简图见图 7.5-49。

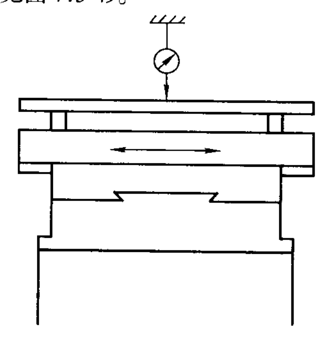


图 7.5-49 工作台移动对工作台面的平行度的检查简图

检验步骤如下。

1）根据被检机床工作台的纵、横向行程，选择一长度与其相适应的 0 级以上精度的平尺。指示器一般选用分度值为 0.001 的千分表，也可以选用分度值为 0.002 的杠杆千分表。

2）将平尺沿测量行程方向置于工作台的中间，其下工作面两端的白塞尔点处用等高块支撑。指示器固定在线架上，指示器测头垂直触及平尺的上工作面，调整平尺位置，使工作台沿测量行程全行程移动时，指示器测头均能触及平尺的工作面。

3）沿测量行程全行程移动工作台，读取指示器示值，其最大与最小读数之差即为该测量行程的平行度误差。

4）该项检验在工作台的纵、横向行程分别进行。

4.2.5 工作台横向移动对工作台纵向的垂直度的检查

GB/T 7926—1987 G5 项规定此项的允差为：0.012/200。检验工具为指示器和角尺。

测量简图见图 7.5-50。

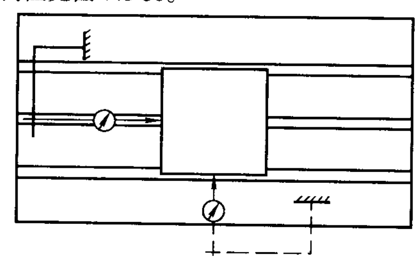


图 7.5-50 工作台横向移动对工作台纵向的垂直度的检查简图

检验步骤如下。

高速走丝线切割机工作台横向移动对工作台纵向的垂直度的检查方法目前常用的有两种：一种是将角尺放置在工作台面上，指示器固定在线架上对其进行测量，此种方法与电火花成形机的线性运动轴运动之间（X、Y 轴之间）垂直度的检查以及低速走丝线切割机工作台横向移动对工作台纵向的垂直度的检查方法一致，见 2.2.2 节和 3.2.4 节；另一种方法是 GB/T 7926—1987 规定的方法，即将角尺放置在线臂上，指示器固定在工作台面上进行测量。这里对此方法作一介绍。

1）根据被检机床纵横向行程选择一长度与其相适应的0级以上精度直角尺。若被检机床纵横向行程过长，选用的直角尺过大，使得其在线架上安置难以实现时，可以按直角尺的长边不少于机床纵向行程的一半选择直角尺。指示器选用分度值为 0.001 的千分表或选用分度值为 0.002 的杠杆千分表，也可以选用电感测微仪等其他测量仪器。测量前还得根据被检机床工作台和线架的尺寸，制作一夹具，使得选用的直角尺能够牢固地安置在线臂上。

夹具简图见图 7.5-51。

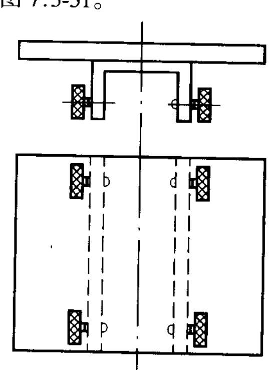


图 7.5-51 垂直度检验用线臂夹具简图

2）将夹具固紧在线臂上，直角尺水平放置在夹具上，直角尺的基准面大致与工作台纵向平行。将工作台置于其横向行程的中间位置。

3）指示器固定在工作台面上，指示器测头垂直触及直角尺的基准面。纵向移动工作台，观察指示器示值，在水平面内调整直角尺，直至指示器在两端示值相等。若直角尺基准边的长度小于工作台的纵向行程，可先在工作台纵向行程的中间段将直角尺基准边大致调平，再将工作台移动到其纵向行程的一端，重新架表，使得指示器测头垂直触及直角尺基准边相应的端头（起始点），读取指示器读数 a。移动工作台，使得指示器测头垂直触及直角尺基准面的另一端头，读取指示器读数 b。再重新架表，将指示器测头返回触及直角尺的基准面的起始点，调整指示器示值为 b，同向移动工作台至纵向行程的末端，读取指示器的读数 c。若 a 与 c 不相等，则沿水平方向轻轻转动直角尺，重复上述操作，直至 a 与 c 相等。此时可以认为直角尺的基准面已与工作台纵向全行程平行了。纵向移动工作台，使其处于行程的中间位置。

4）横向移动工作台，使其处于行程的一端。重新固定指示器，使得指示器的测头垂直触及直角尺的测量面的相应的一端。全行程横向移动工作台，读取指示器示值，其最大与最小读数之差即为该工作台横向移动对工作台纵向的垂直度误差。若直角尺的测量边的长度小于工作台的横向行程，可在工作台横向移动到指示器测头位于直角尺测量边的另一端头读取读数 d 后，重新架表，使得指示器测头返回至直角尺测量边的起始点，调整指示器示值 d，同方向横向移动工作台，直至其行程末端。读取全行程移动时指示器的读数，其最大与最小读数之差即为该工作台即为该工作台横向移动对工作台纵向的垂直度误差。

4.2.6 储丝筒的圆跳动的检查

GB/T 7926—1987G6 项规定此项的允差为：储丝筒直径小于或等于 120 为 0.012；大于 120 为 0.02。检验工具为指示器。

测量简图见图 7.5-52。

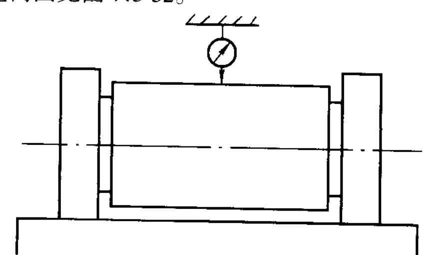


图 7.5-52 储丝筒圆跳动的检查简图

检验步骤如下。

1）指示器选用分度值为 0.001 的千分表、电感测微仪或扭簧表，也可以选用分度值为 0.002 的杠杆千分表。

2）将指示器固定在机床的固定部件上，指示器测头沿直径方向垂直触及储丝筒的工作面。慢速（小于 4 r/min）转动储丝筒 720°以上，观察指示器示值，其最大与最小读数之差即为误差值。

3）此项检验分别在储丝筒的中间和离两端 10 mm 处进行，三处中的最大误差值即为该机床储丝筒的圆跳动误差。

4.3 高速走丝电火花线切割机数控精度的检验

GB/T 7926—1987 标准对高速走丝电火花线切割机的数控精度的检验，在项目的设置、检验工具的选择以及检验方法上，与 JB/T 5543—1991 标准规定的低速走丝电火花线切割机的数控精度的检验完全相同，只是在各个项目的允差值上有所区别。其中，工作台运动的失动量，低速走丝机床规定为 0.004，而高速走丝机床的规定为 0.005。工作台运动的重复定位精度，低速走丝机床的规定与高速走丝机床的规定相同，均为 0.002。工作台运动的定位精度，低速走丝机床规定为：在 300 mm 测量长度上为 0.012，每增加 200 mm，允差值增加 0.005，最大允差值为 0.03；而高速走丝机床的规定为：在 100 mm 测量长度上为 0.01，每增加 200 mm 允差值增加 0.005，最大允差值为 0.03。显然在短行程内，高速走丝机床的精度要求与低速走丝机床相比要低一些，但在长行程上则趋于相同。每一脉冲指令的进给精度，低速走丝机床规定小于一个最小脉冲当量；而快走丝机床则规定为：当行



程小于等于 400 mm 时，允差小于一个最小脉冲当量，当行程大于 400 mm 时，允差小于 2 个最小脉冲当量。

各个项目的测量简图和具体检验步骤，可参阅前述低速走丝电火花线切割机的数控精度检验的相关内容。

4.4　高速走丝电火花线切割机工作精度检验

GB/T 7926—1987 标准对高速走丝电火花线切割机的工作精度，共设置了 5 个检验项目，比 JB/T 5543—1991 标准规定的低速走丝电火花线切割机的工作精度检验少了 2 项，这 2 项为锥度大端尺寸差和最低表面粗糙度。其他 5 个项目在项目名称、检验工具和检验方法上与低速走丝电火花线切割机基本相同，只是项目的允差值上有所区别。

对于正八方试件，低速走丝机床与高速走丝机床的允差相同，即纵剖面上的尺寸差均为 0.012，横剖面上的尺寸差均为 0.015。

对于正四方试件，高速走丝机床只作在规定加工条件下的表面粗糙度检查，其允差值和低速走丝机床一样，为 $R_a \leqslant 2.5\ \mu m$，但加工速度的要求较低一些，只需大于 20 mm^2/min即可。

对于四孔试件，高速走丝机床的要求比低速走丝机床的要低。在加工孔的坐标精度上，低速走丝机床要求为 0.012，而高速走丝机床要求为 0.015；在加工孔的一致性上，低速走丝机床要求为 0.02，而高速走丝机床要求为 0.03。

各个项目的测量简图和具体检验步骤，可参阅前述低速走丝电火花线切割机的工作精度检验的有关内容，这里不再赘述。

编写：连克仁（苏州电加工机床研究所）
靳传玉（苏州电加工机床研究所）



第6章　电加工机床安全防护的检测

电加工机床跟其他机床一样，安全性是产品质量首先要考核的指标。我国的产品质量法对于机电产品安全性的要求，包括了产品不得存在危及人身与财产安全、危害人体健康、对环境造成公害等缺陷，如果机床产品存在这种缺陷，也就是其安全性不能达到规定的要求，那么无论诸如精度、功能、效率等其他质量指标多么先进、多么丰富，该机床仍为不合格产品，不能出厂，不能销售，不能使用。

电加工机床和其他金属切削机床相比，存在或可能产生的危险有较大的不同之处，这是由于电加工机床自身的特点所形成的。例如，电加工机床没有金属切削机床的高速旋转的主轴，因此就不存在高速旋转的主轴及装夹在主轴上的工件或刀具所产生的危险。电加工机床也没有许多金属切削机床在加工过程中产生的切屑所带来的危险等。但是电加工机床在其他方面却存在着比金属切削机床更多的危险源。比如电加工机床由于是将电能直接作为加工的能量形式，机床都必须装备加工电源，因此使机床存在更多的电气危险，并因而需要采取更多的防止电击的防护措施。电加工机床在工作时因为有射频输出而产生的电磁干扰也远比普通金属切削机床要严重，因此要求机床在防护电磁干扰方面采取防护措施。此外，某些电加工机床对于防火、降噪等方面还有严格的要求等。

GB 13567—1998《电火花加工机床　安全防护技术要求》标准对电火花类放电加工机床产品的安全质量从机械安全、电气安全、电磁兼容、防火阻燃、对环境的影响及安全信息等六个方面作了规定。其他类别的电加工机床产品，制造厂商可以参照电火花加工机床的安全质量要求，结合各自产品存在或可能发生危险的特点，根据基础性安全标准，例如GB 5226.1—2002《机械安全　机械电气设备　第1部分：通用技术条件（IEC60204—1：2000）》标准及其他有关标准制定企业标准，以对产品的安全质量进行控制。而电火花类放电加工机床是电加工机床中量最大、面最广的产品，本章就GB 13567—1998《电火花加工机床　安全防护技术要求》标准中各项规定进行介绍。

1　机械安全防护

GB 13567—1998标准对电火花加工机床的机械安全质量作了规定，涉及下列各方面：防止划伤、防止颠覆、限位装置、信号中断的安全性、电极夹持的可靠性、储丝筒的安全运行、联锁机构、操作力、操作性和工作液系统等。

1.1　防止划伤

1.1.1　适用项目

GB 13567—1998：5.2.1、6.1.1（b）。

1.1.2　要求

机床易接触的部位（含外露面）不应有会导致人员伤害的尖棱、尖角、锐边、凸出部分和开口等，以免引起刺伤和扎伤的危险（C类）。

1.1.3　检查

通过目测和触摸检查机床外露部分和易接触部位是否平整，是否有尖棱、尖角和毛刺等。一般情况下，尖棱、尖角、毛刺等在零部件的制造过程中就应采取倒棱倒角的方法去除，以便于机械加工和检查。

1.2　防止颠覆

1.2.1　适用项目

GB 13567—1998：5.2.2、6.1.1（c）。

1.2.2　要求

在预定工作条件下，机床或其部件不应出现意外翻倒、跌落或移动。机床在采用开式导轨时，必须采取防颠覆措施（B类）。

1.2.3　检查

此项的检查主要从以下几个方面进行。

1）通过综合评估，考察机床在结构上重心是否合理，是否能够保证机床在工作时稳固可靠。同时在机床装运时，制造厂应在包装箱外部标示出机床的重心位置，防止搬运时机床倾覆。

2）检查拖板在可移动的最大极限位置时，是否会翻倒、跌落。实施时，检查其运动轴是否有可靠的机械限位，保证移动的拖板伸出支承件的长度小于50%；或者其机械结构是否保证了移动的拖板伸出支承件的长度小于50%；或者移动的拖板上是否设置有防止翻转的结构装置。

3）对于机床的导轨结构（水平面内）检查是否采取了防颠覆措施。对于开式导轨，当颠覆力矩较大时，应采取防颠覆措施，例如采用压板以形成辅助措施等。显然，闭式导轨已经具有了防止颠覆的能力。

1.3　限位装置

1.3.1　适用项目

GB 13567—1998：5.2.3，5.3.2，6.1.1（d）、（e）、（f）、（h），6.1.2（b）。

1.3.2　要求

移动部件都应有可靠有效的机械限位措施。危险性较大的移动部件应有机、电双重限位保护措施（A类）。

1.3.3　检查

1）机床的*X*、*Y*、*Z*、*U*、*V*、*W*等直线运动坐标轴无论其是手动还是机动，均应有可靠、有效的机械限位装置或机械限位设计。

2）上述直线运动坐标轴若为机动轴，或数控运动轴，还应有可靠、有效的电气限位装置。

3）高速走丝电火花线切割机的储丝筒机构的往复运动应有可靠、有效的机械限位装置或机械限位设计。储丝筒在实现其往复运动功能时，其换向开关必不可少，因此，对往复运动的储丝筒实际上是设置了机械、电气双重限位保护措施。

1.4　信号中断时的安全性

1.4.1　适用项目

GB 13567—1998：5.2.4。

1.4.2　要求

要防止在机床紧急停止或其动力和控制信号中断时造成的冲击危险：有可能产生自然移动的部件，对其制动动作不应中断；垂直运动部件不应下落，或返回至设计规定的安全位置（A类）。

1.4.3　检查

此项的检查主要针对快速走丝电火花线切割机的储丝

筒、电火花成形机的主轴及快速移动的各运动轴进行。检查方法为：切断电源，观察相关部件的运动是否中断，是否有自然下落的运动发生。

1）高速走丝电火花线切割机的储丝筒，在切断电源后应能立即停止运转，储丝筒拖板应能立即停止移动。

2）电火花成形机的主轴（Z 轴），在切断电源后应能立即回升至设计规定的安全位置或保持在原来位置，不自然下落。

3）电火花成形机电机驱动的主轴头（W 轴），在切断电源后不应自然下落（若主轴头为手动驱动，在松开锁紧装置后，不应自然下落）。

4）电火花线切割机电机驱动的 Z 轴，在切断电源后，不应自然下落（若为手动驱动，在松开锁紧装置后，不应自然下落）。

5）各快速移动的运动轴，例如数控电火花成形机、低速走丝电火花线切割机的 X、Y 轴等的快速移动功能在切断电源后应能立即中止。

1.5　电极夹持的可靠性

1.5.1　适用项目

GB 13567—1998：5.2.5、6.1.1（g）。

1.5.2　要求

电极夹持装置应安全可靠，确保不使电极坠落或在旋转时被甩出而造成抛射危险。自动交换电极的装置应可靠，不使电极脱落（B 类）。

1.5.3　检查

此项的检查是针对电火花成形机设置的。

1）普通电火花成形机的电极夹持装置应能对设计允许的电极实施可靠夹持。

① 选用有代表性的电极在电极夹持装置上进行装夹，当电极夹紧装置对电极的夹紧动作完成后，用手扳动电极，检查其是否松动，是否会脱落。将电极转换角度后重新装夹，再检查。每次检查中电极均不得松动和脱落。

② 在电极夹持装置上装夹规定允许的最大重量的电极，令主轴作快速回升、下降，再回升、再下降。如此进行多次快速往复运动试验，电极应不松动，不偏移（注意：在作此项试验前，电极安装板下方的工作台面上应铺设防护装置，以免电极脱落对工作台的损害）。

2）带有 C 轴或 R 轴的电火花成形机，当在其电极夹持装置上装夹上规定允许的最大重量电极时，以设计规定的最大转速驱动 C 轴或 R 轴作旋转运动，检查电极是否有松动、脱落和抛射现象出现。紧急停止旋转后，用手扳动电极，检查其是否松动。

3）对于带有自动交换电极（AEC）装置的电火花成形机，在 AEC 装置规定的最大电极重量下，令其进行自动交换电极试验。

① 在每次自动交换的过程中，不能出现电极交换不到位而脱落的现象；

② 在每次自动交换电极后，电极应被牢固夹紧，不能出现松动、脱落等现象；

③ 在交换的任一过程中，切断电源，令信号突然中断，不能出现电极脱落的现象。

1.6　储丝筒的安全运行

1.6.1　适用项目

GB 13567—1998：5.2.6、6.1.1（h）。

1.6.2　要求

此项是针对高速走丝电火花线切割机设置的（A 类）。

1）储丝电机必须有专用的制动按钮；

2）储丝筒应有有效的防护罩；

3）储丝筒的上丝手柄应有安全措施；

4）储丝筒转轴（或转轴的延伸件）不得外露；

5）储丝筒运转时不应出现电极丝的缠绕和抛射。

1.6.3　检查

1）检查储丝电机的制动按钮，看其是否为单独设置的专用按钮，不能用整机关机按钮或急停按钮替代。在储丝筒运转状态下，按动储丝筒的制动按钮，观察其对储丝筒的制动是否有效。

2）储丝筒的上方应设置有防护罩。

应有标记表明，在正常工作时不得打开储丝筒的防护罩，或使防护罩与储丝筒运丝电机联锁。当在机床正常工作状态下，打开储丝筒的防护罩，运丝电机应立即停止运转。

3）为防止电极丝的缠绕和抛射，应有断丝保护装置，即在断丝时储丝筒应立即被制动。检查时可做断丝试验，当电极丝断开时，储丝筒应立即停止转动，保证不发生电极丝的缠绕和抛射现象。

4）储丝筒的上丝手柄在无人力作用时，应能自动脱开；如不能自动脱开，应与控制系统联锁，使得只有在手柄被取下或不暴露于表面时，储丝筒方可转动。

5）目测检查储丝筒转轴的端部（或转轴的延伸件）是否外露。

1.7　联锁机构

1.7.1　适用项目

GB 13567—1998：5.3.4、6.1.2（c）。

1.7.2　要求

对于需有联锁要求的机床防护装置，当打开联锁的防护装置时机床应停止工作或不能启动，并应确保在防护装置关闭前不能启动机床。本项目是用于机械安全的联锁装置，对于电气安全的联锁机构的要求见 2.9 节（A 类）。

1.7.3　检查

带联锁的防护装置可以在高速走丝电火花线切割机的储丝筒防护罩和电火花磨床工作区的防护罩，或其他机床、其他部位设置。带联锁的防护装置应做到防护装置被打开时，相关的机构停止运动或脉冲电源被切断。同时还必须具有防护罩关闭前，机床不能正常启动的功能。

1.8　操作力

1.8.1　适用项目

GB 13567—1998：5.4.5、6.1.2（i）。

1.8.2　要求

手轮、手柄的操纵力在机床全行程范围内应均匀一致，并不大于表 7.6-1 中的数值（B 类）。

表 7.6-1　操纵手轮、手柄的操纵力

主机质量/t	≤2	>2~5	>5~10	>10
经常用手轮、手柄/N	40	60	80	120
不经常用手轮、手柄/N	60	100	120	160

注：1. 每班使用次数大于 25 次的手轮，手柄为经常用手轮、手柄。

2. 用于夹紧、调整、维修用手轮、手柄，其操作按设计要求。

1.8.3　检查

1）用手按顺时针和逆时针方向摇动手轮、手柄，使移动件作往返运动，感觉操纵力的变化。操纵力在移动件作全行程往返运动时，应均匀一致，无明显变化。检查时应注意

感觉手轮、手柄摇动时有无突然变重的突变点，并记录突变点的位置。

2）用弹簧测力计在移动件移动的首、中、末三个位置测量手轮或手柄的操纵力。测量时用弹簧测力计的测钩钩住手轮或手柄，通过测力计，沿手轮的切线方向拉动测力计，直至手轮开始转动、测力计指针出现峰值（拐点）停止。测力计指针位于峰值时的读数，即为该手轮该位置的操纵力。首、中、末三个位置的读数应基本一致，且不应超过表 7.6-1 的规定。

3）在用手摇动时感觉到的突变点的位置，用弹簧测力计测量该处手柄的操纵力，其数值与首、中、末三个位置测量时的读数不应悬殊太大，且不应超过表 7.6-1 规定的数值。

1.9 操作性

1.9.1 适用项目

GB 13567—1998：5.4.6、5.4.7、6.1.2（i）。

1.9.2 要求

操纵手轮、手柄和仪表的安装高度应符合表 7.6-2 的规定（C类）。

表 7.6-2 操纵手轮、手柄和仪表的安装高度

使用情况	操纵手轮、手柄离地面高度/m	观察读数的仪表安装高度/m
经常使用	0.5 – 1.7	0.7 – 1.7
不经常使用	0.3 – 1.85	0.3 – 2.5
仅调整时使用	≤2	

1.9.3 检查

1）按表 7.6-2 的要求用钢卷尺检测操纵手轮、手柄的中心位置至地面的距离。

2）对于操纵手轮、手柄的位置高于 2 m 的机床，其操作位置应设置操作台、踏脚板等。

3）用钢卷尺测量机床上仪表的中间至地面的距离，其数值应不超过表 7.6-2 的规定。

1.10 工作液系统

1.10.1 适用项目

GB 13567—1998：5.9.1、5.9.2、6.1.4（b）。

1.10.2 要求（C类）

1）工作液系统不得渗漏。

2）工作液管路必须耐压。

3）与具有腐蚀性的工作液直接接触的零部件应采取防锈措施。

1.10.3 检查

1）启动工作液泵，使工作液循环和过滤系统正常工作，工作液充满各管路和容器。如果系统压力可调，将压力逐渐调至最大，保持适当的时间后，检查工作液泵、管路、阀、容器（工作液箱、工作液槽）、各管接头等处是否有渗漏现象出现。

2）工作液系统的阀、接头、管道等，应具有 1.5 倍最大工作压力的耐压性能。

3）对于锈蚀性工作液的防锈措施。

① 对于高速走丝电火花线切割机等采用皂化液作为工作液的机床，因造化液有一定的防锈作用，与工作液直接接触的零部件不必采用防锈材料制作，但应在其使用说明书中说明工作台、导轨等的维护与保养要求，以明确告知用户其应采取的防锈措施。

② 对于低速走丝电火花线切割机、高速小孔机等采用去离子水或普通水作为工作液的机床，与工作液直接接触的工作台、工件安装台、搁板、压板、线臂、旋转头、电极夹头以及工作液系统的相关零部件等均需采用防锈材料制作，以防止机床锈蚀而造成机械故障的危险。

2 电气安全防护

GB 13567—1998 标准对电火花加工机床的电气安全质量要求，与 GB 5226.1—2002（IEC60204—1：2000）《机械安全 机械电气设备 第一部分：通用技术条件》标准中的规定是基本一致的。主要涉及：控制系统的可靠性、急停功能、停止器件、脉冲电源输出线的绝缘、保护电路连续性、绝缘电阻试验、耐压试验、电源适应能力、电箱直接触电的防护、电箱（壁龛）一般要求、残余电压、电箱防护等级、电机、照明等。

2.1 控制系统可靠性

2.1.1 适用项目

GB 13567—1998：5.4.1、5.4.2、5.4.4。

2.1.2 要求（B类）

1）机床运动部件的控制及操纵系统应功能可靠，并确保所有功能不相互干扰；

2）控制系统应能承受预期的工作负荷和外来影响，控制信息载体的中断和损坏，不应导致危险局面的出现；

3）设置控制器件时应考虑到误操作所带来的附加危险，容易出现误操作的控制器件应在设计上考虑容错，要防止由于无意或偶然触及控制器件所引起的以外启动；

4）数控机床应为每种控制功能设置工作状态选择开关，其每一个位置只允许对应一种控制方法或工作状态。

2.1.3 检查

机床控制系统的可靠性的检查，可在机床进行运行试验时同时进行。

1）对机床各项控制功能的可靠性的检查，可在机床运行时检查以下方面的内容：

① 各运动轴的控制与操作是否可靠。

② 脉冲电源的控制是否可靠。

③ 工作液系统的控制是否可靠。

④ 其他控制功能如储丝筒控制，液面、液温控制，运丝控制，自动灭火器控制，安全防护装置的控制等是否可靠等。

2）在机床运行时，检查其各项控制功能是否有相互干扰现象。

3）在进行机床的抗干扰试验、高温运行试验和振动试验时，检查机床的各项控制功能是否受到影响。

4）检查机床在控制信号和载体的中断和损坏时，是否会导致危险局面的产生。一般有以下内容。

① 对于电火花成形机，重点检查加工时控制信号的中断和损坏是否会造成主轴的下落。

② 对于高速走丝电火花线切割机，重点检查储丝筒在运转时，当控制信号突然中断和损坏时，储丝筒是否会被立即制动。

③ 对于自动交换电极装置，重点检查控制信号突然中断时是否会造成电极的跌落。

④ 对于液面、液温控制装置，重点检查当其开关的控制信号突然中断时，脉冲电源是否立即关闭。

5）对于容错的检查，主要包括以下内容。

① 对于使用可燃性工作液的电火花加工机床，在机床正常工作时，有意触及工作液泵的控制器，使工作液泵停止工作，形成工作液流中断。此时，脉冲电源应能自动断开。

此项检查主要是防止无意或偶然触及工作液泵控制器件而造成火灾的危险。

② 对于电火花成形机，当液面、液温控制开关断开时，任何误操作都不能使脉冲电源接通。此项检查也是为了防止火灾的危险。

③ 使用可燃性工作液加工的电火花机床，不能先接通脉冲电源后接通工作液泵，也不能两者同时接通。检查时，可在工作液泵关闭的情况下，触及脉冲电源控制器，此时脉冲电源应无法接通。启动工作液泵，在工作液系统正常工作时，触及脉冲电源控制器，此时，脉冲电源应能被正常打开。在脉冲电源和工作液泵均关闭的情况下，同时触及两者的控制器，此时，工作液泵可以启动，而脉冲电源不能被打开，应仍处于关闭状态，只有再次触及其控制器件后，才能被打开。

④ 电火花成形机主轴在调整时，一旦当电极和工件接触时，控制系统应能给出信号，令主轴立即向上回退，以免引起电极与工件碰撞的危险。

6）检查数控机床的工作状态选择开关，看其是否一个位置对应一种控制方式或工作状态。这是对数控机床的基本要求。

2.2　急停功能

2.2.1　适用项目

GB 13567—1998：5.4.3、6.1.3（g）。

2.2.2　要求（A 类）

1）急停器件的设置数应满足每个操作位置均应设置一个的要求；

2）急停器件应不能自动复位；

3）急停器件复位时，应不自动产生机床的运动和脉冲电源的放电。

2.2.3　检查

1）对于急停器件的形式，电火花加工机床采用的急停器件基本上均为蘑菇头式按钮开关。其操作件为红色，如果操作件后面有衬托色，应为黄色。

2）电火花加工机床的急停按钮的设置有几种情况。

① 如机床的主机与电箱（柜）是分开的，并在主机上有电气控制操作面板，应在电器箱（柜）和主机的操作面板上分别设置急停按钮。

② 如主机上无电气控制操作面板但有操作盒，则电器箱（柜）和操作盒上都应设有急停按钮。

③ 如果操作位置都集中在电器箱（柜）上，则只要电器箱（柜）上设置急停器件即可。

3）对机床上的每个操作位置的急停按钮均进行按动试验，检查是否具有自锁功能。即在无着意施加的外力作用下，急停器件应不能自动复位。按钮的复位必须经旋动后才能实现。

4）在急停按钮未经手动恢复前，按动机床的启动按钮，观察机床，此时机床的电路应不能恢复，机床的运动部件和高频脉冲电源均不能启动。装有多个急停按钮的机床，任一个急停按钮没有复位前，机床均不能被有效启动。

5）操纵急停按钮，令其复位（每个急停器件均需复位），观察机床，此时机床应未被启动，即在急停按钮复位时，机床不能产生任何运动，且脉冲电源也未被接通。

2.3　“停止”器件

2.3.1　适用项目

GB 13567—1998：5.4.3

2.3.2　要求

每个“启动”控制器件附件均应设置一个“停止”器件；“停止”器件的功能和颜色应符合要求（B 类）。

2.3.3　检查

1）目测检查每个“启动”器件附近是否均设置了一个“停止”器件。

2）在按动机床的“启动”器件，使机床的相关功能被启动后，按动“停止”器件，其相应的“启动”器件的功能应被立即否定。

3）再次按动“停止”器件（停止器件复位），机床的相关功能应未被启动，除非再次按动“启动”器件。即停止器件的复位不应引起任何危险的情况出现。

4）“停止”器件的操作件应使用黑、灰或白色，优先使用黑色。不允许使用绿色。也允许使用红色，但若靠近紧急操作器件，建议不使用红色，以免和紧急操作器件混淆。

2.4　脉冲电源电缆线的绝缘

2.4.1　适用项目

GB 13567—1998：5.5.1、5.5.2、6.1.3（a）。

2.4.2　要求（A 类）

1）电箱（柜）引出的脉冲电源的电缆线应与电箱（柜）及机床主体绝缘。

2）电箱（柜）的脉冲电源的输出端的接线柱不应外露。

2.4.3　检查

1）目测检查电箱（柜）的脉冲电源的电缆线是否跟电箱（柜）之间采取了绝缘措施。

2）目测检查电箱（柜）的脉冲电源的输出端的接线柱是否外露，是否有直接电接触的危险。

3）检查脉冲电源的机床接入端与机床主体的绝缘。

① 对于电火花成形机，检查主轴端部靠近工具电极的部位是否有可靠的绝缘层使工具电极与机床主体绝缘；检查工具电极夹具的调节部分（如调整手柄等）是否由绝缘材料制成或有绝缘层与工具电极隔开。

② 对于电火花线切割机床，检查其运丝系统中与电极丝直接接触的零件是否为绝缘材料制成，或是否有绝缘层与机床主机隔开。

③ 对于其他电火花加工机床，可按同样要求检查。

2.5　保护电路连续性

2.5.1　适用项目

GB 13567—1998：5.5.3、6.1.3（f）、6.2.1（a）。

2.5.2　要求

机床应可靠接地，满足保护电路的连续性要求（A 类）。

1）电器设备和机械的所有裸露导体件都应连接到保护接地电路上；

2）当绝缘失效时，保护电路任何部件的电阻不应在裸露导体件上呈现危险的电压；

3）连接件和连接点的设计应不受机械、化学和电化学的作用而削弱导电能力；

4）机床必须有保护接地电路的外接端子（PE 端子），以便用户将机床的保护接地电路可靠地与外部保护接地系统连接。该端子应设置在各引入电源有关相线端子的邻近处，且标志应符合要求。

5）保护接地导线必须采用专用的黄绿线，或在其端头或易接近的位置上清楚地标示图形符号或用黄绿双色组合标记；

6）用作保护导体的汇流排不能与中性导体（N）的汇流排混用，且一个独立部件最多只能设置一个汇流排，汇流排上每个接线端只能接一根线；

7）保护接地电路的接线应符合树枝状的接线要求；

8）保护接地电路的外接端子（PE 端子）和电气设备及机械所有的裸露导体上的测试点间的试验压降不得超过表 7.6-3 的规定。

表 7.6-3

被测保护导线支路最小有效截面积/mm²	1.0	1.5	2.5	4.0	>6.0
最大的实验电压降/V	3.3	2.6	1.9	1.4	1.0

2.5.3　检查

（1）目测检查保护接地电路是否符合要求

1）检查机床上的电气设备和机械的所有裸露导体件是否都连接到了保护接地电路上。

2）连接件和连接点的设计是否会受机械、化学和电化学的作用而削弱其导电能力。

3）保护导线是否符合要求。

① 检查保护导线是否专用，不得用金属软管、硬管和电缆护套及其他导线来代替，而且这些金属导线管和护套自身（电缆铠甲、铅护套等）也要用保护导线连接到保护接地电路上。

② 检查保护导线的颜色是否符合要求，黄绿线是保护接地电路绝对专用线，一般情况下必须使用。如果保护导线能容易从其形状、结构（如编制导线）或位置上识别或者黄绿线一时难以购买，则可以不在整个长度上使用颜色代码，但应在其端头或易接近的位置上清楚地标示⏚图形符号或用黄绿双色组合标记。

③ 检查门、盖或面板上是否安装有电气设备（符合保安特低电压的电气设备除外），若有应检查其紧固件、铰链、滑动接点等是否设计成低电阻连接。一般情况下，这些门、盖或面板上应有保护导线连接。

④ 检查保护接地线是否能足以承受其可能流过的接地故障电流。一般情况下，保护导线应选用铜导线，且其截面积应符合 GB16895.3—1997 中 5.4.3 或 GB7251.1—1997 中 7.4.3.1.3 的规定。在使用非铜质导线的场合，其单位长度电阻不应超过允许铜导体单位长度电阻。

4）检查保护接地电路的接线是否符合要求：

① 检查保护接地电路的连线是否符合树枝状接线要求；

② 检查保护导线的接点是否都有⏚图形符号；

③ 检查保护接地导线的连接是否牢固，两端子之间是否有接头或拼接点，一般情况下，保护导线两端子之间只能由一根完整的导线连接，不能有接头、焊接点；

④ 保护导线应尽可能靠近有关的负载安装，以便减少回路电阻；

⑤ 检查汇流排，是否一个独立部件上只设置了一个汇流排，且汇流排上的每个接线端是否只接了一根导线。

5）检查保护接地电路的外接端子（PE 端子）是否符合要求：

① 检查机床是否安装了保护接地电路的外接端子，保护接地电路的外接端子必须专用，不得用中线（N）代替，也不得与中线混接；

② 检查外接端子是否安装在与引入电源有关的相线的邻近处；

③ 检查外接端子的标志是否符合要求，即应使用字母 PE 来指明，以避免与电器设备和固定装置间的连接点相混淆；

④ 检查外接端子的尺寸是否符合要求。检查时主要看其是否与表 7.6-4 规定截面积的外部铜保护导线相匹配。

表 7.6-4　外部保护导线的最小截面积

设备供电相线的截面积 S/mm²	外部保护导线的最小截面积 S/mm²
$S \leqq 16$	S
$16 < S \leqq 35$	16
$S > 35$	$S/2$

（2）保护接地电路连续性试验压降的检测

当机械安装和电气连接完成后，通过回路阻抗测试检查保护接地电路的连续性。

1）试验设备　接地电阻仪（也可以选用其他能提供 PELV 保安特低电源、安全性能及准确度等级与其等效的设备），误差 ±0.05 V。

2）试验方法

① 将仪器接通电源后，调整仪器的输出电流 $I \geqslant 10$ A，试验时间 $t \geqslant 10$ s。

② 将仪器的两根测量引线的夹子互相夹起来，按动测试按钮，此时，仪器上显示的电压应为零或很小，可以忽略不计。

③ 用仪器上的一根测量引线的夹子夹住被测机床的保护接地电路的外部端子（PE 端子），另一根测量引线上的夹子夹住机床电气设备或机械的裸露导体件上的某个测试点。按动测试按钮，此时 PE 端子与测试点间的保护接地回路上已被引入了来自仪器的频率为 50 Hz、电流为设定值（≥10 A）且持续时间 ≥10 s 的电流。观察并记录仪器的示值，其电压降应不超过表 7.6-3 的规定。在仪器持续试验 ≥10 s 的时间，并自动关闭后，将测试点上的夹子移到另一个测试点夹牢，重复上述操作，直至机床（电箱）上的所有测试点均被检测完毕。

④ 机床上凡装有电器设备的各独立部件均须检测，即机床（主体、门、盖和面板等）、水箱或油箱、电箱（或脉冲电源装置、控制台、机床电器装置等）、电机与泵的外壳、金属软管、硬管和电线护套等均需设置测试点进行检测。

⑤ 如果没有提供保护导线支路最小有效截面积（或线径尺寸），在对机床进行保护接地试验压降评判时，均按测量支路的最大压降不超过 1.0 V 要求。

2.6　绝缘电阻试验

2.6.1　适用项目

GB 13567—1998：5.5.4、6.2.1（b）。

2.6.2　要求

在机床的动力电路导线和保护接地电路间施加 500 V DC 电压时，测得的绝缘电阻不得小于 1 MΩ（A 类）。

2.6.3　检查

1）试验设备　兆欧表，DC500 + 100 V、精度 1.0 级。也可以选用其他等效的设备。

2）试验方法

① 试验前应将机床的动力电源输入端与电网脱开；电源开关（空气开关）应置于导通的位置，空气开关后的动力电路上若设置有接触器，则应将其置于导通位置，以确保机床的所有动力电路都处于导通的状态。

② 将机床（电箱）的动力电源的三相交流输入端短接为一“点”，将兆欧表的两个测试端子用导线分别连接到其供电电源的输入端和保护接地电路的外接段子（PE 端子）上。摇动兆欧表，速度逐渐加快，观察其指针的变化，待仪表的显示值稳定后，读取读数，其测量值不应小于 1 MΩ。

③ 当机床的动力电源的输入端不止一个时，应当分别对每个电源输入端进行测试，其测量值均应不小于 1 MΩ。

④ 测试结束后，应用接地线对机床（电箱）作安全放



电，电路复原。

2.7　耐压试验

2.7.1　适用项目

GB 13567—1998：5.5.4、6.2.1（c）。

2.7.2　要求

机床电器设备的所有电路导线和保护接地电路之间应经受至少 1 s 时间的耐压试验，试验期间没有击穿和飞弧现象（工作在 PELV 电压的电路除外）（A 类）。

2.7.3　检查

1）试验设备　耐压试验仪，其施加电压范围为 0 ~ 3 000 V、频率为 50 Hz、波形为正弦波、输出功率为 0.5 kV·A、输出电流≥5 mA。也可以选用其他等效的测试设备。

2）试验方法

① 试验前应将机床的动力电源输入端与电网脱开；电源开关（空气开关）应置于导通的位置，空气开关后的动力电路上若设置有接触器，则应将其置于导通位置，以确保机床的所有动力电路都处于导通的状态。

② 若机床（电箱）上安装有不适宜经受高压试验的元器件，试验前，应将其断开；若空气开关上带有接地电容，应将该电容脱开，空置的两端短接；若接有浪涌器件，应将其脱开，空置的两端短接。

③ 将机床的（电箱）的三相动力电源的输入端短线接成一“点”。

④ 将仪器电源线插头插入电源插座，并令仪器处于复位状态；电压调节旋钮逆时针旋转到底；将漏电电流的截断值设置在适当的位置。

⑤ 用高压测试棒将仪器的高压输出端与机床的动力电源的输入端牢固连接起来，用连接导线将仪器的工作接地端与机床的保护接地电路的外接端子牢固连接起来。

⑥ 打开电源开关，按动启动按钮，顺时针旋转电压调节旋钮，将电压调整到设定电压值。仪器的设定电压值为试验电压，按我国的电网电压，应该设定在 1 000 V，其频率应为 50 Hz。按下复位按钮，切断电压输出。调节定时拨盘，设定检测时间为大于 1 s。根据电加工机床的实际情况，一般情况下，可设置到 30 s 以上。对于空气开关上带有接地电容者，或接有浪涌保护器件者，再将其脱开、短接试验后，再将其短接的器件恢复，再经受 1 s 时间的试验，此时仪器的检测时间应设置为 1 s。

⑦ 按下启动按钮，进入测试状态。此时，如果超漏指示灯亮，同时蜂鸣器发出报警声，则表明被测机床的漏电流大于设定值，被测机床不合格；如果在设定的检测时间内，无报警信号，仪器到时会自动复位，表明漏电流不大于设定值，被测机床合格。

⑧ 测试结束后，用接地线对机床（电箱）作安全有效的放电，电路复原。

2.8　电源适应能力

2.8.1　适用项目

GB 13567—1998：5.5.4。

2.8.2　要求

当外接交流电源电压在额定输入电压 380 V ± 10% 的范围变化时，机床应能正常运行（B 类）。

2.8.3　检查

1）试验设备　三相调压器，其功率应大于 5 kW（也可以根据机床总功率采用相适应的调压器）。

2）试验方法

① 将三相调压器的输出端与机床动力电源的输入端相连接，再将三相调压器的输入端与电网电源相连。

② 调整调压器，令其输出电压为额定电压值 380 V。启动机床，机床应正常运行。

③ 调整调压器，令其输出电压逐渐减小至 342 V，观察机床的运行状况，应无异常情况出现。

④ 调整调压器，令其输出电压逐渐增大至 418 V，观察机床的运行状况，应无异常情况出现。

结合电火花加工机床产品的技术条件标准的规定，本项试验在接入电压为 342 V 和 418 V 时，各运行 2 h，应无异常情况出现，无危险发生。因此，本项试验可结合机床的负荷试验、加工试验同时进行。

2.9　电箱直接触电的防护

2.9.1　适用项目

GB 13567—1998：5.5.4、6.1.3（c）（d）。

2.9.2　要求

电火花加工机床的电箱（含电柜、壁龛等）在一般情况下应满足：电箱应有门锁，非专业人员不能打开；打开电箱门时，应有联锁开关切断电源；打开电箱后，电箱内联锁开关仍不能切断的带电部件，其防护等级至少为 IP2X，并有警示标志。电箱内的电气设备应提供对残余电压的防护措施（A 类）。

2.9.3　检查

1）对于门上装有门锁、必须使用钥匙或工具由熟练技术人员或见习员才能开启护壳（门、罩、面板等）的电箱，应符合以下条件。

① 门内所有带电部件防护直接触电的防护等级至少为 IP1X 或 IPXXA。即电箱内的设备能防止固体的某一大面积（如手）偶然或意外地触及带电部件或运动部件。

② 如果设备需要带电对电器重新调整或整定，操作上有可能触及的带电部件的防护直接接触的防护等级应至少为 IP2X 或 IPXXB。即电箱内的设置应能防止边长或直径大于 12.5 mm 的固体异物和防止手指或长度大于 80 mm 的类似物体触及电箱内操作时有可能触及的带电部件或运动部件。

③ 在机床使用说明书上应对开启电箱（即门、罩、盖板等）的人员提出符合上述条件的要求。即非专业人员不能开启电箱。

2）对于采用了开门断电防护措施的电箱，虽然在开启外壳之前先切断了内部的带电部件，还应符合以下条件。

① 开门断电功能的是由门与电源切断开关的联锁机构来实现的，只有当电源切断开关断开后，电箱的门才能被打开，并且只有在电箱的门被关闭后，电源切断开关才能被接通。

开门断电有多种形式，对于采用操纵空气开关的操作钮把的联锁开关，要求只有在操作开关的操作钮把置于断开位置时，才能将门打开，并且只有在将门关闭后，才能将空气开关的操作钮把恢复到接通位置。电加工机床上普遍使用了操纵继电器的门开关，则要求门开关对继电器的控制应安全有效。即在电箱启动后，打开电箱的门，继电器应有效地切断电源；在门仍然开启的状况下，按动机床的启动按钮，机床应不能被启动，即继电器应无响应。只有在门被关闭后，按动启动按钮，继电器才能恢复通电。

② 开门后电箱内仍然带电的部件应进行防护，其防护等级至少为 IP2X 或 IPXXB，同时这些部件应标明警告标志。

例如采用操纵继电器的门开关的电箱，它的空气开关的输入端、输出端及继电器控制变压器的输入端均应加以防护；至于控制变压器的输出端及继电器的输入端，一般情况下，其电压为低于 PELV 的保安特低电压，故可以不作防护，如若其电压超过 PELV 的保安特低电压，则必须加以防护。



③ 如果一台机床上有多个电箱，或一个电箱上有多个门，或安装于其他地方（如壁龛内）的电气部件，凡属同类情况，都应设置开门断电装置，要分别进行检查。

④ 有些机床具有整体性罩壳，如果这样的罩壳同时作为防止直接触电的护壳，则也应设置开门断电装置，作同样的检查。

3）对于既不需要钥匙或工具就能打开其护壳（门、盖、罩等），也不需要在切断其带电部件后才能打开其护壳的电箱，设置在其内部的所有带电部件的防护等级均至少为IP2X或IPXXB。

① 这类电箱由于无开门防护措施，在其护壳易开启部位应贴上警示标志。

② 电箱内的所有带电部件均应作不低于IP2X或IPXXB的防护，并贴有警示标志。

③ 如电箱内的带电部件用搁板作防护时，则要求使用工具才能拆除搁板，或拆除搁板时应能自动断电。

4）对于残余电压的防护措施的检查

① 当电源切断以后，电箱内任何残余电压高于60 V的外露可导电部分，都应在5 s内放电到60 V或60 V以下。检查时可观察机床或电箱面板上的电压表，当切断电源后，看其指示是否在5 s内降到60 V或60 V以下。如果达不到，应增设放电器件。也可用万用表对电箱内易于存储电荷的元件作上述检查。

② 如果这种防护办法会干扰电器设备的正常功能，则应在容易看见的位置或装有电容的外壳临近处，作耐久性警告标志，提醒注意危险，并说明在打开门或断电后的必要延时。

③ 对插头、插座或类似的器件，拔出它们会裸露的导体件（如插针），放电时间不应超过1 s，否则这些导体件应加以防护，直接接触的防护等级至少为IP2X或IPXXB，或采用附加的断开器件或适当的警告标志。

2.10 电箱（壁龛）一般要求

2.10.1 适用项目

GB 13567—1998：5.5.4。

2.10.2 要求（C类）

① 电气装置的安装位置应便于操作和维修；

② 与电气设备无直接联系的非电气器件不应安装在电箱内；

③ 安装电气设备的壁龛与安装冷却、润滑、液压、工作液等设备的隔间应采取有效的隔离措施；

④ 电箱面板按钮应符合GB 5226.1—2002中10.2的要求。

2.10.3 检查

1）机床上所有控制设备的安装都应易于从正面操作和维修，当需要用专用工具拆卸器件时，应能提供这些专用工具。为了常规维修或调整而需接近的有关器件，应安置于维修站台以上0.4～2 m之间。接线座一般应至少在维修站台以上0.2 m，且应使导线和电缆容易连接其上。

2）检查电箱内是否安装有与电器设备无直接联系的非电气器件，若有，应建议其移去，或采取相应措施以防止意外危险的发生。

3）检查电气设备是否与冷却、润滑、液压、工作液等易于对电气设备造成危害的其他设备分开安装；安装电器设备的壁龛与安装冷却、润滑、液压、工作液等其他设备之间是否进行了有效隔离。原则上两者之间不应有通孔相连，如有通孔，应保证其他设备所产生的液体不会流到电气器件上。

4）按GB 5226.1—2000标准中10.2的要求检查电箱的面板按钮。

按钮操动器的颜色代码应符合表7.6-5的要求。

表7.6-5　按钮操动器的颜色代码及其含义

颜色	含义	说明	应用示例
红	紧急	危险或紧急情况时操作	急停 紧急功能启动
黄	异常	异常情况时操作	干预制止异常情况 干预重新启动中断了的自动循环
绿	正常	启动正常情况时操作	
蓝	强制性的	要求强制动作的情况下操作	复位功能
白	未赋予特定含义	除紧急以外的一般功能的启动	启动/接通（优先） 停止/断开
灰			启动/接通 停止/断开
黑			启动/接通 停止/断开（优先）

注：如果使用代码的辅助手段（如形状、位置、标记）来说明按钮操纵器，则白、灰、黑同一颜色可用于各种不同的功能上（如白色用于启动/接通和停止/断开）

检查时重点注意以下几个方面。

①“启动/接通”操动器的颜色应为白、灰或黑，优先使用白色，也允许选用绿色，但不允许用红色。

② 急停和紧急断开操动器应使用红色。

③“停止/断开”操动器应使用黑、灰或白色，优先使用黑色。不允许用绿色。也允许选用红色，但靠近紧急操动器件时不能使用，以免与紧急操动器混淆而误用。

④ 对于“启动/接通”与“停止/断开”交替操作的按钮操动器，优选颜色为白、灰或黑。不允许用红、黄或绿。

⑤ 对于按动即引起运转而松开则停止运转的按钮操动器，其优选颜色为白、灰或黑。不允许用红、黄或绿。

⑥ 复位按钮应为蓝、白、灰或黑。如果它们还用作“停止/断开”按钮，最好使用白、灰或黑，优先选用黑色，但不允许用绿色。

检查面板按钮的标记是否符合表7.6-6的规定。

表7.6-6

启动/接通	停止/断开	启动/接通与停止/断开交替动作	按动则运转而松开则停止运转
GB/T 5465.2 │	GB/T 5465.2 ○	GB/T 5465.2 ⦶	GB/T 5465.2 ⊤ in circle

注：标记最好直接标在操动器上，也可以标在操动器的附近。

2.11 电箱防护等级

2.11.1 适用项目

GB 13567—1998：5.5.4、6.1.3（b）。

2.11.2 要求

电箱的防护等级应不低于IP54的要求（B类）。

2.11.3 检查

防护等级IP54的具体要求为防尘（不能完全防止尘埃进入壳内，但进尘量不足以影响电器的正常运行）和防溅水（承受任何方向的溅水应无有害影响），同时具有防止一定尺寸的金属异物的进入要求。

1）防尘检查需在专门设备中作防尘试验。用滑石粉通过线径为0.05 mm、网孔尺寸为0.075 mm的金属方孔筛后沉



积在电箱中的滑石粉量（将其视为不导电、不易燃、不易爆和无化学腐蚀的尘埃）是否影响电器的正常运行来判定能否达到要求，试验持续时间为 8 h。

2）防水检查要在专门的喷水试验设备上作喷淋试验。试验时水压为 80 kPa，水流量大于等于 101 L/min，电箱置于转台上旋转或作小的摆动，以 60°/s 的角速度向左右循环摆动 60°，试验时间为 10 min。

3）上述防尘、放溅水试验及防止金属异物的具体要求和方法详见GB/T 4946.2。

电箱的进尘和进水的通道主要是散热的通风口和电箱的门缝。对于门缝，只要没有明显的缝隙（能防止外来固体物进入和防止水喷射进去），其进尘量一般不足以危害电器的正常运行。对于通风口，需要设置过滤网或加塑料百叶窗。机壳上的冷却风扇要有防尘装置。

4）电火花加工机床的脉冲电源如果含有功耗电阻，因其发热量大，若采用加防护罩的通风口可能不能满足其散热要求而导致其他危险，因此，对其另作要求。

① 若脉冲电源功率级安装于单独的护壳内，对该护壳按 GB 5226.1 标准中"装有其他设备的通风电柜：IP33"的要求检查。防护等级 IP33 的要求为：能防止直径或厚度大于 2.5 mm 的工具、金属线等进入壳内，且与垂直线成 60°范围以内的淋水对其应无有害影响。

② 若脉冲电源功率级的护壳是机床电箱的一部分，应保证该部分与机床电箱的其他部分可靠地隔断。

③ 如果脉冲电源的功率级不是单独安装的，而是作为机床电箱的一部分，则对该部分的要求与机床电箱相同。即应达到 IP54 的防护要求。

2.12 电机

2.12.1 适用项目

GB 13567—1998：6.1.3（h）。

2.12.2 要求（A 类）

1）电动机的防护等级至少为 IP23；

2）电动机及其机架设备的安装应具有良好的牢固性、操作性和检查维修性；

3）电动机的外壳应保护接地。

2.12.3 检查

1）电动机的防护等级至少为 IP23，正规的电动机均能达到该要求。某些伺服电机与步进电机的导线是直接从壳内引出的，其导线连接至附近的接线端应有防护罩壳。

2）目测检查电动机及其机架等其他设备的安装是否具有良好的保护性、操作性和检查维修性。

3）检查机床上所有电动机的外壳是否进行了有效的保护接地（结合 2.5 节同时进行）。

2.13 照明

2.13.1 适用项目

GB 13567—1998：5.11.2、6.1.4（d）。

2.13.2 要求（B 类）

对于机床上提供安全工作所需的照明装置的，应符合相关的规定。

2.13.3 检查

机床上如果配备了照明装置，应作如下检查。

1）机床的照明电路应由 50 VAC 以下电源供电。如果使用较高电压的则不应超过 250 VAC，且应有保护接地措施。

2）照明电路的所有未接地导线应使用单独的过电流防护器件防护短路，以与防护其他电路的防护器件分开。

3）照明灯的反光罩应安装在灯架上，而不应用灯头座支撑。

4）开关不应在灯头座上或悬挂在软线上。

2.14 其他

2.14.1 适用项目

GB 13567—1998：5.5.4。

2.14.2 要求

电气系统的其他环节，如电箱内的配线与导线要求，电箱外的配线与导线要求（例如护套的完整性与连接的牢固性），过流保护，插头座、变压器等元器件的质量等，应符合安全性要求。

2.15.3 检查

按照 GB 5226.1—2002 标准中相关的规定，对这些环节进行检查（不一一列举）。

3 电磁兼容性（EMC）

电磁兼容性要求机床在电磁环境下能正常运行，并且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁干扰。机床的电磁兼容性，包含了双向的要求，及机床抗御外界电磁干扰的能力，以及机床对外界产生电磁干扰的水平。

GB 13567 标准对电火花加工机床的电磁兼容性仅作了电网接入要求。

3.1 适应项目

GB 13567—1998：5.7.1

3.2 要求

电火花加工机床为 GB 4828 标准中的 2 组 A 类设备（A 类）。

GB 4828《工业、科学和医疗（ISM）射频设备电磁骚扰特性测量方法和限值》标准将工业、科学和医疗射频设备分为两组（按设备本身划分）和两类（按使用环境划分），电火花加工机床属于 2 组 A 类。要求机床接入非家用和不直接连接到住宅低压供电网上。

3.3 检查

检查机床的供电电源接入端，要求接入方式为三相接入，不得使用单相电源接入方式，并应在使用说明书中说明机床接入电网的要求。

4 防燃、防火（适用于使用可燃性工作液的电火花机床）

4.1 工作液

4.1.1 适用项目

GB 13567—1998：5.6.1、5.6.2、6.2.2（a）。

4.1.2 要求（A 类）

1）可燃性工作液的闪点必须在 70℃以上。

2）使用可燃性工作液的机床（如电火花成形机）必须采用浸入式加工，且应使液面高度与工作电流相适应。

4.1.3 检查

1）检查机床的使用说明书和相关警示标志，是否对机床所使用的可燃性工作液的闪点提出了明确要求，是否明确告知用户或操作者在选用可燃性工作液时必须选用闪点高于 70℃的工作液。

2）检查机床的使用说明书和相关警示标志，是否对机床在加工时的工作方式提出了明确要求，是否明确告知用户或操作者在加工时必须采用浸入式加工方式。

3）检查机床的使用说明书，是否向用户提出了使用可燃性工作液加工时的液面高度要求。通常情况下，使用说明



书中应指明：在工作电流≤50 A时，加工工件表面到工作液面的距离（简称液面高度）应≥50 mm；工作电流增大，液面高度应相应增加。

4.2 液面监控装置

4.2.1 适用项目

GB 13567—1998：5.6.3、6.2.2（b）。

4.2.2 要求

使用可燃性工作液的机床应采用可靠的液面高度监控装置（液面控制器）并与脉冲电源联锁，确保液面不在设定的高度以上时，机床不能放电加工。（A类）

4.2.3 检查

1）检查使用可燃性工作液加工的机床的工作液槽是否安装有液面监控装置。

2）检查机床工作液槽中液面调节装置。其液面设定操作器件（油杆）在调节时应无卡滞现象；在任何一个可设定的位置上，均不得自行下落；液面设定区应有液面设定高度指示标尺。

3）液面监控装置试验。

① 调节工作液槽上的液面设定操作器，将液面高度设定在机床所允许的最大高度上。

② 启动机床，打开工作液泵，在工作液槽内的工作液面未达到设定高度时，按通脉冲电源开关，此时脉冲电源应不能接通。

③ 当液面达到设定高度后再按通脉冲电源开关，此时脉冲电源应能接通并放电。

④ 将油杆拉起，使液面降至设定位置以下，脉冲电源应被自动切断。

⑤ 在机床工作油槽液面高度指示标尺的中间及下端，重复上述检查，应均有效。

4.3 液温监控装置

4.3.1 适用项目

GB 13567—1998：5.6.3、6.2.2（b）。

4.3.2 要求

使用可燃性工作液的机床应采用可靠的液温监控装置（液温控制器），并与脉冲电源联锁，确保在工作液温度≥60℃时，机床不能放电加工（A类）。

4.3.3 检查

1）检查使用可燃性工作液的机床是否在工作液槽上安装有液温监控装置。

2）液温监控装置试验。

① 试验设备 加热器，烧杯，温度计（或点温计）。

② 试验方法

ⅰ）将加热器置于机床的工作台上（此时工作液槽内无工作液），盛有可燃性工作液的烧杯置于加热器上，将机床上所安装的液温监控装置的液温传感器的测头置于烧杯内的工作液里，试验用温度计（或点温计）的测头置于烧杯内的工作液里。

ⅱ）将液面监控装置解锁，按通脉冲电源的电路。

ⅲ）将加热器接通电源，对烧杯加热，当温度计显示烧杯内的液温达到60℃时，液温监控装置应将脉冲电源切断。

③ 也可以根据机床所配置的液温监控器的类型、性能，采取其他合适的试验方法。

4.4 灭火器（适用于使用可燃性工作液的电火花机床）

4.4.1 适用项目

GB 13567—1998：5.6.3、6.2.2（a）。

4.4.2 要求（A类）

1）使用可燃性工作液的机床应配置符合要求的灭火器。

2）自动灭火装置应与机床总电源联锁。

3）使用说明书中应明确指导用户选用灭火器类型及使用方法。

4.4.3 检查

1）检查使用可燃性工作液的机床是否配备了灭火器。

2）机床如果配备的是手动灭火器，则检查以下内容。

① 检查灭火剂类型，要求采用适用于电气着火及油类着火的灭火剂。

② 检查灭火剂剂量，要求符合表7.6-7的规定。

表7.6-7 灭火剂剂量

工作液槽面积/mm	<1 250×1 000	1 250×1 000	1 600×1 250	2 000×1 500
灭火剂量/kg	≥2	2～3	3～4	6

对于电火花成形机，按上表检查；对于电火花磨床，根据其工作液槽的大小，参照上表的要求检查，一般其灭火剂的剂量为2 kg。

③ 检查灭火器是否有有效的合格证。

④ 检查灭火器生产企业的生产许可证。

⑤ 检查灭火器的有效期，看其是否在有效期内。

3）机床如果配备的是自动灭火器，除按上述手动灭火器的检查内容①～⑤项进行检查外，还得作如下检查。

① 按JB 1043—1999《电火花成形机用自动灭火器 技术条件》5.3和5.4的内容，检查灭火器的外观、装配及在机床上的安装位置是否符合要求（JB 1043—1999的适用范围为电火花成形机，对于使用可燃性工作液的其他电加工机床可参照使用）。

② 对于不同于JB 1043—1999标准所规定的自动灭火器按相关标准检查。

③ 检查自动灭火器与机床的总电源是否联锁，做联锁功能试验。

按JB 1043—1999标准所规定的方法，令机床处于加工运行状态，脉冲电源开通；将机床装备的自动灭火器接通所规定的电源；按下自动灭火器的“检查”按钮。此时机床的总电源应被切断（自动灭火器的控制电源不包含在其中），报警器响。维持状态持续5 s以上时间，以检查自动灭火装置单独供电点可靠性。

4）检查机床的使用说明书。使用可燃性工作液的电火花加工机床的使用说明书中应包含有关于灭火器的类型、剂量、使用方法、安装位置、维护、保管、灭火剂的再充装等相关内容。

5 环境影响

5.1 噪声

5.1.1 适用项目

GB 13567—1998：5.10.1、5.10.2、6.1.4（c）。

5.1.2 要求（A类）

1）机床在运行时不应出现不正常的尖叫声和冲击声。

2）机床整机噪声声压级不得超过83 dB（A）。

5.1.3 检查

1）操作机床的各运动轴及运动部件，检查是否有异常的尖叫声和冲击声。

2）对机床的整机噪声进行检测。

① 检测设备 精密声级计，其测量误差不超过0.5 dB（A），测量范围为31.5～8 000 Hz（40～140 dB）



② 检测方法

ⅰ）机床四周离墙壁的距离应大于2 m，且在其四周2 m内不应有其他杂物。

ⅱ）机床周围应无明显的金属冲击声、机械振动声、人畜吵闹声等影响机床噪声测量的其他声源。

① 测量并记录机床周围环境的本底噪声。

② 测量机床各检测点的噪声。

ⅰ）开动机床，令其在额定工况下工作（一般在最大生产率时进行）。

ⅱ）在机床的四周测量点进行测量，测量点按前、后、左、右、左前、右前、左后、右后等不少于5点布点，且应尽量使测量点靠近机床上的电机、齿轮箱、运动轴等易产生噪声的特征点。

ⅲ）测量时声级计应于地面保持平行，其测头应在离地面1.5 m、离机床1 m的位置指向机床。

ⅳ）测量在声级计的A级计权挡进行。当声级计的测头位于测量点的正确位置时，按动测量按钮，观察声级计指针的变化，调整其测量挡位，直至指针在其面板上的0～10 dB处稳定停止下来后，读取其测量值；如指针不能稳定停止在某一数值上，而是以较快的频率在一较小的区间内上下摆动，则读取其摆幅的最高点和最低点，以其平均值作为该点的测量值；如指针以较缓的速度在一区间上下移动，其高点和低点有较明显的周期性，且最高点和最低点的数值均较稳定，则以最高点的读数作为该点的测量值。

ⅴ）如相邻两测量点的测量值相差大于5 dB，应在其中间再增加一个测量点进行测量。

③ 数据处理　将各测量点的测量值与环境的本底噪声进行比较，如测量值大于本底噪声10 dB以上，则测量值即为机床所产生的噪声值，以各测量点上的最大值作为该机床的整机噪声；如测量值大于本底噪声6～10 dB，根据GB/T 16769—1997标准的规定，对测量值按表7.6-8进行修正，以修正后各测量点的最大值作为该机床的整机噪声。

表7.6-8

机床噪声实测值与本底噪声声压级值差/dB	>6～8	>8～10
从实测值中减去数/dB	1	0.5

如测量值大于本底噪声的值在6 dB以下（含6 dB），则该测量值无效。

5.2 油雾，烟雾（适用于电火花成形机类机床）

5.2.1 适用项目

GB 13567—1998：5.8.1、6.1.4（a）。

5.2.2 要求

电火花成形机类机床（含电火花磨床）应有排气装置，或设置有排气接口，并在其使用说明书中告知用户排气的必要性及排气装置的性能、参数及使用要求等（C类）。

5.2.3 检查

1）对于最大加工电流大于50 A的机床，应在机床的上方设置排气装置或排气口，排气口的设置应使其便于与专用排气装置上的管道连接。

2）对于最大加工电流小于等于50 A的机床，可以不在机床上设置排气装置或排气口，但要在使用说明书中做出说明。如果用户将该类机床安装在100 m^2 以下的室内，则需在墙上开出排气口，以便于油雾和烟雾的排出。

3）对于加工区带防护罩的电火花磨床，由于其油雾、烟雾难以散发，要求其必须设置排气口及排气装置，以防止油雾、烟雾的危害和火灾的发生。

6 其他

6.1 使用说明书

6.1.1 适用项目

GB 13567—1998：7.3

6.1.2 要求（C类）

1）使用说明书中应有内容全面具体的关于机床安全的要求。

2）使用说明书中要明确提醒操作者在操作中可能会面临的危险。

3）使用说明书中应有相关危险的防护措施及防护方法的详细说明。

6.1.3 检查

查阅使用说明书，检查说明书中是否将各种可能发生的危险及安全防护要求充分告之用户。

（1）机床的运输、搬运和储存信息

1）机床的安全储存条件。例如应有防水、防潮、防火的一般要求，还应符合GB 5226.1—2002标准中5.4中关于电气设备的储存与运输条件。

2）机床的尺寸、重量和重心位置。

3）机床搬运说明。例如起吊设备的施力点等。

4）机床的包装要求，应符合JB/T 8356系列标准中对于包装箱、包装技术条件所列安全要求。

（2）机床交付试运转的信息

1）机床固定和基础的要求。

2）装配和安装要求　安装的空间要求，使用可燃性工作液的机床还应考虑工作场地的防火（包括屋顶、建筑材料等）及通风、排气等要求。

3）机床允许的使用条件。例如环境、温度、湿度和振动等要求，主要应符合GB 5226.1—2002标准中4.4.3～4.4.6所列条件。

4）机床动力电源的连接说明，对动力电源的要求应符合GB 5226.1—2002标准中4.3.2的条件，并应明确为非家用或不能直接连接到住宅低压供电网络，还包括接地装置的要求。

（3）机床自身信息

1）机床产生的噪声数据。

2）机床各种安全功能的说明和图表。

（4）机床的使用信息

1）使用前和使用中可能出现的危险情况，以及安全防护、警告标志及说明。

2）启动及运行过程中的操作程序、方法、注意事项及容易出现的误操作和防范措施。

3）运行中的监测和记录。

（5）机床维修信息

使用说明书中应提供维修人员进行维修的安全技术要求。

（6）机床的使用说明书应经久耐用

6.2 警示标志

6.2.1 适用项目

GB 13567—1998：6.1.5（a）。

6.2.2 要求

机床上醒目的地方及易产生危险的部位（包括防护装置）应有关于电气危险、火灾危险、油雾烟雾中毒、爆炸危险、挤压危险及其他有关的安全警示标志，以警告操作者注意各种危险（C类）。

6.2.3 检查

安全警告标志需针对机床的结构、特征设置。一般来讲，下述各处应有警告标志：

1）对于电火花成形机类使用可燃性工作液的机床，在机床主机的正面易观察到的地方，应有火警标志；

2）机床电气箱（柜）的外部应有闪电标志，电气箱（柜）的内部带有危险电压的器件应有闪电标志；

3）机床电源开关处应有闪电标志；

4）机床的接地线应有接地标志，保护接地电路的各连接端子应有接地标志，保护接地电路的外接端子应有明显的PE标志；

5）机床的工作区外部应有闪电标志或警示说明；

6）机床及其附件的注油位置和润滑点应有标志，操作件的颜色应与主机不同。

6.3 包装

6.3.1 适用项目

GB 13567—1998：7.3.1。

6.3.2 要求

1）机床包装箱应牢固、结实，并有防潮、防振、防撞措施（C类）；

2）包装箱外面应有自身的外形尺寸，所包装的机床的尺寸，重量、重心位置等必要信息（C类）。

6.3.3 检查

1）在机床未包装前检查其包装箱所用的材料（底托、面板、顶板、筋等）是否符合要求，其强度是否能够确保机床在整个装卸运输过程中不会出现跌落、歪斜以至于倾覆等危险。

2）检查包装箱的顶板和侧板，看其对所包装的机床是否能够起到防淋雨、防溅水的作用。

3）对包装后的机床，检查其是否有防潮、防振、防碰撞措施。所谓防潮措施，一般情况下指的是机床及其附件上应罩有塑料罩或铝箔罩或其他防淋水罩套，若为了加强防潮效果，还可在罩套内放置防潮剂等。所谓防振、防碰撞措施，指的是机床要牢靠地固定在包装箱的底托上，机床的拖板、滑枕等运动部件应固定，尤其是容易下滑的部件应用木条、钢板或其他连接材料牢固地支撑，确保在发生振动和撞击时，不会出现相对位移而产生危险。

4）检查包装箱外部面板上是否标有外形尺寸、质量、质心位置及起吊点；是否有防浸水、防淋雨等其他必要的标志。

编写：连克仁（苏州电加工机床研究所）

参 考 文 献

1 国家质量技术监督局政策法规宣传教育司编．最新产品质量法解析与应用．北京：中国计量出版社，2000
2 林景星，陈丹英编．计量基础知识．北京：中国计量出版社，2002
3 罗南星编．测量误差及数据处理．北京：中国计量出版社，1987
4 国家质量技术监督局计量司组编．测量不确定度评定与表示指南．北京：中国计量出版社，2001
5 王建业，徐家文编著．电解加工原理及应用．北京：国防工业出版社，2001
6 航空制造工程手册编委会．航空制造工程手册：特种加工．北京：航空工业出版社，1993
7 陈远龙，朱树敏．脉冲电流参数对电解液非线性特性及锻模电解加工的影响．电加工，1991（2）